Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg

Mémoire de soutenance de Diplôme d'Ingénieur INSA

Spécialité TOPOGRAPHIE

Création de modèles numériques d'élévation pour intégration de projets architecturaux via l'acquisition de données photogrammétriques par drone

Présenté en **Septembre 2014** par **Nicolas FEHRENBACH**

Réalisé au sein de l'entreprise : **ARCHIMED-GE**

32 rue Wimpheling

67000 STRASBOURG

Directeur de PFE :

M.DAILLY
Géomètre expert

Correcteur :

M. ALBY

Avant-propos

Les drones sont une nouvelle technologie dont le nombre d'application croît de jour en jour. Ce Projet de Fin d'Etude m'a permis de découvrir comment fonctionne un drone et comment l'appliquer à notre profession de topographe.

J'ai appris que ce sont des petits objets qui utilisent une technologie très avancée et qu'il faut apprendre à maîtriser. Les drones peuvent rapidement devenir incontrôlables pour quelqu'un qui ne les maîtrise pas correctement.

Travailler dans un cabinet de géomètres experts est intéressant car c'est un métier dans lequel il faut sans cesse essayer d'innover. Voilà pourquoi mettre au point un système alliant la photogrammétrie et les drones dans une telle structure est d'autant plus enrichissant.

Cependant, il n'a pas était facile de combiner ces deux éléments. Si certaines entreprises proposent des systèmes qui sont totalement automatiques, j'ai pour ma part dû apprendre à faire voler le drone manuellement. La prise de vue n'est pas simple non plus car il faut s'assurer que les photos soient nettes, présente assez de recouvrement et permettent de créer un modèle 3D.

La rédaction du dossier pour obtenir les autorisations est aussi intéressant car c'est la garantie, pour l'administration, pour l'entreprise et pour le pilote du drone que les vols vont se déroulés dans les meilleures conditions possibles. La rédaction de ce dossier est donc très importante.

Finalement, ce Projet de Fin d'Etude aura été une expérience très enrichissante qui me servira probablement par la suite et qui pourrait servir à un grand nombre de cabinets de géomètre expert, je l'espère.

Remerciements

Je veux remercier MM. Sylvain DAILLY et Christophe LEGORGEU pour m'avoir accueilli dans leur cabinet de géomètres experts. Ils m'ont déjà très bien suivi durant mon Projet de Recherche Technologique au premier semestre et cela a été pareil durant toute la durée de mon Projet de Fin d'Etude au sein de leur cabinet. Ils m'ont fait confiance, ils m'ont aidé et ils m'ont soutenu pendant mes 6 mois de projet. Je les remercie pour tout cela.

Je veux aussi remercier tous les employés du cabinet Archimed-GE pour leur très bon accueil. C'est un cabinet où il règne une très bonne ambiance et je me suis tout de suite senti à l'aise parmi eux.

Je tenais à remercier Mme Elodie MONATH, pour l'aide précieuse qu'elle m'a apportée lors de la rédaction du Manuel d'Activité Particulière.

Je veux remercier les enseignants de la section Topographie de l'INSA de Strasbourg pour les cours et les enseignements qu'ils nous ont donnés, à nous les étudiants, et sans qui nous ne pourrions pas exercer le métier de topographe. Je voulais aussi remercier M. Emmanuel ALBY pour avoir corriger mon mémoire de Projet de Fin d'Etude.

Enfin, je voulais remercier mes parents, qui m'ont toujours poussés à faire des études et qui m'ont soutenu moralement et financièrement tout au long de mon parcours.

Table des matières

Avant-propos 2
Remerciements 3
Introduction 6
1 Description des drones 8
1.1 Définition 8
1.2 Historique 8
1.3 Les différents types de drones 9
1.4 Applications possibles des drones 12
1.5 Dernières innovations 12
2 Législation 13
2.1 Les différentes catégories de drones 13
2.2 Les différentes catégories de vol 14
2.3 Les équipements de sécurité 15
2.4 Les documents administratifs 15
2.5 Conclusion sur l'étude législative 16
3 Le drone : un hexacoptère DJI S800 17
3.1 Description du DJI S800 17
3.2 Description du Wookong M 17
3.2.1 Paramètres utiles pour la photogrammétrie 18
3.2.2 Paramètres nécessaires au respect de la législation 21
3.3 Description de la radiocommande Graupner MC-32 22
3.4 Les éléments optionnels du drone 23
3.4.1 Un parachute de secours 23
3.4.2 Un kit de transmission vidéo 23
4 Choix de l'appareil photo 24
4.1 La caméra GoPro 24
4.1.1 Test de modélisation sur un petit objet 25
4.1.2 Test de modélisation sur une façade de bâtiment 27
4.1.3 Test en vol 28
4.2 Les appareils photo présentant un minimum de distorsions 28
4.2.1 Les critères de sélection 28

4.2.2 L'appareil photo choisi : Olympus PEN E-PM1 29
4.3 Conclusion sur le choix de l'appareil photo 32
5 Constitution du dossier pour la demande de vol 33
6 Méthodologie appliquée pour les vols 34
6.1 Vol pour la modélisation d'un MNE 35
6.2 Vol pour la modélisation d'un bâtiment 36
7 Modélisation 3D 38
7.1 Les différents logiciels testés 38
7.1.1 123D Catch 39
7.1.2 Recap 360 39
7.1.3 Project Memento 40
7.1.4 Les autres logiciels 40
7.2 Les logiciels choisis : Recap 360 et Project Memento 42
7.3 Comparaison avec un MNE plus précis 42
8 Rendu au client 47
9 Concept d'un LiDAR aéroporté par drone 49
9.1 Description du concept 49
9.2 Problématique de ce concept 49
9.3 Solution envisagée pour le système d'acquisition 50
9.4 Solutions envisagées pour le système de positionnement 50
9.5 Utilisation de la radiogoniométrie dans ce projet 51
9.5.1 Concept 51
9.5.2 Calcul de la précision a priori d'un tel système 53
9.5.3 Calcul du coût estimatif d'un tel système 55
9.6 Conclusion sur ce concept 55
Conclusion 56
Bibliographie 57
Sommaire des annexes 59

Introduction

La recherche, l'innovation et l'amélioration de nos technologies sont des moteurs de notre croissance. Chaque jour, de nouvelles découvertes technologiques nous permettent d'améliorer la productivité, de développer de nouvelles méthodes plus sûres, plus rapides ou plus efficaces. Nous vivons dans un monde où la technologie est devenue omniprésente et indispensable.

Les drones représentent la technologie d'aujourd'hui : ils sont utilisables par tous, mobiles et présentent un nombre d'applications déjà conséquent. De ce fait, le développement des drones civils et la progression de leur marché ne cessent de croître depuis le début des années 2000 pour atteindre plus de 43 milliards de dollars en 2012 (Pires, Rayner M. & al [2014]). Des sociétés comme RedBird ou DeltaDrone, qui ont été créées il y a moins de 5 ans, présentent déjà des flottes impressionnantes ainsi que des prestations dans tous les domaines scientifiques ou artistiques déjà explorés par le drone.

Avec cette croissance sont arrivés plusieurs textes juridiques régissant le vol de drone. La France est le premier pays à avoir mis en place une législation pour les drones : les arrêtés du 11 avril 2012 relatifs à « *la conception des aéronefs civils qui circulent sans aucune personne à bord, aux conditions de leur emploi et sur les capacités requises des personnes qui les utilisent* » et à « *l'utilisation de l'espace aérien par les aéronefs qui circulent sans personne à bord* ». Le drone est, dans l'imaginaire collectif, une arme ou un objet de surveillance plutôt qu'une avancée technologique aux multiples applications, d'où une législation assez stricte et contraignante.

Le groupe Archimed est un groupement d'entreprises comprenant un cabinet de géomètres-experts, Archimed-GE, un bureau d'Etude et de maîtrise d'œuvre en Voirie et Réseaux Divers, Archimed-BET, ainsi que deux structures plus petites, Archimed-Envirronement et Archimed-Conseil. Ce groupe cherche à suivre les innovations technologiques malgré un contexte économique difficile. Le drone, associé à la photogrammétrie, représente donc pour ce cabinet une nouvelle technologie qui peut se révéler très efficace pour le levé de bâtiments ou la création de Modèle Numérique d'Elévation (MNE), par exemple.

Ce Projet de Fin d'Etudes a pour but principal la mise en place d'un outil fonctionnel de création de modèle 3D texturé via l'acquisition de données par drone. Cet outil comprend la préparation du vol avec le drone, le respect de la législation, le choix des systèmes d'acquisition de données, l'acquisition des données et le traitement de ces données jusqu'au rendu final.

Nous avons essayé d'atteindre ce but de deux manières. La première méthode est la plus simple, il s'agit de la photogrammétrie. Cette méthode est utilisée depuis longtemps pour calculer les coordonnées de points à partir de plusieurs photographies et connaît, comme les drones, une forte évolution depuis l'arrivée des ordinateurs. La seconde méthode est plus compliquée. Elle consiste en la création d'un distancemètre qui mesurerait des points à la verticale du drone, ce qui permettrait d'obtenir un semis de points pour la création de MNE.

La préparation du vol ainsi que le respect de la législation ne diffère pas d'une méthode à l'autre.

Pour les deux méthodes, nous avons essayé, autant que faire se peut, d'utiliser les logiciels open-source à notre disposition, ainsi que du matériel et des méthodes de travail simples à mettre en œuvre et à reproduire dans n'importe quel cabinet de géomètre-expert.

1 Description des drones

1.1 Définition

Un drone ou UAV (Unmanned Aerial Vehicle) est un aéronef inhabité, piloté à distance, semi-autonome ou autonome, susceptible d'emporter différentes charges utiles le rendant capable d'effectuer des tâches spécifiques pendant une durée de vol pouvant varier en fonction de ses capacités. (www.techno-science.net, [2014])

Cependant, le terme drone commence à être utilisé pour tout objet piloté à distance. On parle ainsi de drones terrestres ou sous-marins sans que ceux-ci ne soient des aéronefs. Dans la suite du rapport, le terme drone ne représentera que les aéronefs.

Le drone est composé de trois parties : la structure, le système de pilote automatique et la station de contrôle. Ces trois parties sont indépendantes et interchangeables les unes des autres car elles sont souvent fabriquées par différentes entreprises. Cependant elles sont aussi complémentaires et certaines combinaisons sont plus efficaces selon la catégorie du drone.

La structure comprend les ailes, les hélices, la nacelle et le châssis du drone. Le système de pilote automatique comprend le GPS, la centrale inertielle, la gestion des déplacements du drone en vol et de la nacelle, la gestion des batteries. La station de contrôle comprend la radiocommande permettant de piloter le drone en vol, les logiciels de vol automatique et l'ensemble FPV (First Person View) dans les cas où il y en a un.

1.2 Historique

Les premiers drones sont apparus au milieu du XIX^{ème} siècle pour des raisons militaires. Des ballons d'air chaud ont été utilisés pour prendre des photos aériennes de Paris en 1858 par Gaspard-Félix Tournachon (Colomina, I., & al. [2014]). La photo aérienne la plus ancienne dont nous ayons trace est une photo de Boston prise en 1860 par James Wallace Black.

Photo aérienne de Boston prise en 1860 par J. W. Black

Avant la Première Guerre mondiale, des ingénieurs allemands ont mis au point un système embarqué équipé d'un intervallomètre. Ce système était ensuite fixé sur des pigeons, déjà utilisés pour le transport de messages à cette époque. Les deux Guerres mondiales ont énormément apportés à la photographie aérienne et aux sciences en général. Des appareils photos spécifiques ont spécialement été conçus pour la photogrammétrie aérienne et des capteurs infrarouges thermiques y ont été rajoutés pour pouvoir détecter les ennemis qui se cachaient dans les forêts.

Ce n'est que durant les années 1970 qu'une utilisation civile des drones a été réellement envisagée par la communauté scientifique. Mais la croissance et l'utilisation de ces drones dans le secteur civil n'a réellement commencé que dans les années 2000 pour connaître un développement très fort et un nombre d'applications en constante augmentation de nos jours.

De plus en plus d'appareils fonctionnant normalement avec un pilote vont être « dronisés ». Cela a déjà commencé dans le secteur militaire avec des avions comme le F-16 de Boeing, un avion de chasse utilisé dans les années 80 par l'armée américaine, ou le MQ-8C, un hélicoptère de combat. Le fait de piloter à distance les appareils permet de gagner du temps de vol supplémentaire, des économies sur le carburant, de la légèreté car les appareils sont plus petits et la sécurité des pilotes.

1.3 Les différents types de drones

Il existe de nos jours plusieurs types de drones qui ont chacun leurs spécificités, leurs applications et leurs limites fonctionnelles. Il existe 6 grandes catégories :

- Les micro-drones
- Les mini-drones
- Les drones tactiques
- Les drones MALE (Medium Altitude, Long Endurance)
- Les drones HALE (High Altitude, Long Endurance)
- Les drones de combats

Ces quatre dernières catégories sont réservées au secteur militaire. Ce sont donc les micro-drones et les mini-drones qui vont nous intéresser par la suite. Les différences principales qui existent entre ces deux catégories sont le poids et l'envergure du drone. Il existe ensuite des différenciations vis-à-vis des structures et des conceptions des drones, qui ont eux aussi les caractéristiques spécifiques.

- Les **voilures fixes** constituent la catégorie des drones du type avion. Leurs applications portent essentiellement sur des projets de longues distances ou nécessitant un recouvrement important. Ne pouvant pas faire de vol stationnaire, la modélisation 3D de bâtiments est compliquée.

Avantages : Leur configuration leur permet de parcourir de longue distance assez rapidement.
Inconvénients : Ils ne peuvent pas faire de surplace et risque une chute en cas de panne de l'unique hélice.

Drone à voilure fixe : un Delair Tech DT-18

- Les **voilures tournantes** constituent la catégorie des drones du type hélicoptère ou multirotor. Ils ont la capacité de décoller dans des zones où la place est assez restreinte, pour rejoindre des zones de missions rapidement et y faire des vols lents ou stationnaires.
  Avantages : Les voilures tournantes permettent de faire des vols stationnaires ou lents. Leur charge utile transportable est assez élevée en tenant compte de leur taille. Les multicoptère sont considérés comme les drones les plus stables. Plus il y a d'hélices, plus le multicoptère sera lourd, mais il sera plus stable. De plus, un octocoptère ou hexacoptère pourra encore voler si une des hélices tombent en panne, ce qui n'est pas le cas pour un hélicoptère ou un drone à voilure fixe.
  Inconvénients : Ils sont assez lourds et nécessitent des batteries puissantes, et donc, aussi lourdes. Leur temps de vol limité les destine plutôt à des projets de petits chantiers ou des bâtiments qu'à de la photogrammétrie sur de longues distances.

Drone à voilure tournante : un hexacoptère DJI S800

- Les **ballons captifs ou aérostats** sont des drones qui ne peuvent se déplacer que verticalement. Ils sont basés sur le principe des montgolfières, utilisant les lois de physique comme la poussée d'Archimède pour s'élever à l'aide d'un gaz plus léger que l'air. Leur autonomie est donc très largement supérieure à celle des deux autres

catégories. Ils permettent d'observer une même zone pendant une période donnée pour voir son évolution durant ce laps de temps.
Avantages : Ils peuvent voler pendant plusieurs jours sans atterrir.
Inconvénients : Leurs déplacements horizontaux sont très limités.

Un ballon captif mis en place par Phodia

- Les **ailes volantes** sont des drones similaires à ceux à voilure fixe mais ils sont plus petits. Ils permettent de recouvrir une zone comme pourrait le faire un avion dans le cadre d'un projet de photogrammétrie aérienne. L'altitude de vol est cependant réduite ainsi que la taille des pixels au sol. Souvent accompagnés d'un logiciel de photogrammétrie, ce type de drone permet de réaliser facilement des MNE ou des orthophotos. Cependant leur prix est encore largement supérieur à celui d'un drone à voilure fixe ou tournante.
  Avantages : Les ailes volantes sont les drones les plus légers disponibles sur le marché (par rapport à un drone d'une autre catégorie de la même taille). Les vols peuvent durer plus longtemps qu'avec une autre catégorie de drone et ils sont plus facilement transportables.
  Inconvénients : La charge utile transportable par les ailes volantes est très faible du fait de leur configuration. Impossibilité de les contrôler sans les logiciels mis à disposition. Du fait de leur poids léger, ils sont très sensibles aux conditions climatiques et notamment au vent.

Une aile volante : ebee

1.4 Applications possibles des drones

D'abord militaire, l'usage des drones s'est ouvert au grand public depuis le début des années 2000. Voici une liste des différentes applications possibles à ce jour (sans tenir compte de la taille du drone ou de la législation en vigueur) (Colomina, I. & al. [2014]) :

- Modélisation de bâtiment, MNT, MNE, ortho-image, levé de façade
- Archéologie (Remondino, F. & al [2011])
- Mission dans les zones dangereuses (centrale nucléaire, usine chimique,…) ou inaccessible à l'homme (Han, J. & al. [2013])
- Inspection des ouvrages d'art
- Evaluation des dégâts en cas de catastrophe naturelle
- Surveillance des cultures agricoles
- Recherche scientifique (Eisenbeiss, H. [2004])
- Thermographie (Réglementation thermique 2012, recherche de victimes d'avalanche)
- Etude des sols (mine, carrières)
- Lidar (sol ou bathymétrie) (Wallace, L. & al [2012])

La possibilité de faire telle ou telle application réside essentiellement dans le choix du drone (poids, charge utile transportable, taille,…) et dans la réglementation en vigueur dans le pays où va se dérouler le projet.

1.5 Dernières innovations

En constante évolution, les concours d'innovation sont régulièrement organisés par les grands fabricants de drones comme Parrot. On a ainsi pu trouver des drones pilotés grâce aux Google Glass ou un GPS à bas prix utilisant la technologie RTK.

Les concepts peuvent varier de la programmation de logiciels au développement de la structure même du drone. Des chercheurs sont sur le point de développer un nouveau genre de batteries air-zinc qui seraient bien plus puissantes et plus légères que les batteries lithium-ion utilisées actuellement.

2 Législation

L'utilisation des drones n'est que récente dans le secteur civil et c'est pourquoi, le gouvernement français réglemente cette activité de manière très stricte (Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement [2012]). Un grand nombre de lois ont été votées pour éviter tout débordement avec l'utilisation de cette nouvelle technologie. Dans cette partie, nous allons expliquer les termes législatifs, ainsi que le respect des lois avant et pendant le vol du drone.

2.1 Les différentes catégories de drones

La législation définit tout d'abord 7 catégories de drones qui sont indépendantes des catégories que nous avons vues précédemment :

Les différentes catégories de drone selon la législation

- **Catégorie A :** cette catégorie représente les aéronefs qui pèsent moins de 25 kilogrammes et qui ne sont qu'à usage personnel.
- **Catégorie B :** cette catégorie représente les aéronefs qui pèsent plus de 25 kilogrammes et qui ne sont qu'à usage personnel.
- **Catégorie C :** cette catégorie représente les ballons captifs et les aérostats qui pèsent moins de 25 kilogrammes et qui ne sont qu'à usage professionnel.
- **Catégorie D :** cette catégorie représente les aéronefs qui ne sont utilisés qu'à des fins professionnelles (photogrammétrie, photos, vidéos,...) et qui pèsent moins de 2 kilogrammes, chargement compris, avant le décollage.
- **Catégorie E :** cette catégorie représente les aéronefs qui n'appartiennent ni à la catégorie C, ni à la catégorie D et qui pèsent moins de 25 kilogrammes avant le décollage.
- **Catégorie F :** cette catégorie représente les aéronefs qui pèsent moins de 150 kilogrammes avant le décollage.
- **Catégorie G :** cette catégorie représente les aéronefs qui pèsent plus de 150 kilogrammes avant le décollage.

Les drones compris dans les catégories C, D et E sont ceux utilisés dans le secteur civil, alors que ceux compris dans les catégories F et G sont des drones militaires. La

législation intègre toutes ces catégories car les utilisations possibles de chacune peuvent différer en fonction du scénario de vol présenté dans la partie suivante (voir Annexe A).

2.2 Les différentes catégories de vol

Avant d'obtenir l'autorisation de voler avec un drone, il faut préciser le type de "scénario" qui va être affecté à l'opération voulue. Ces "scénarios" dépendent essentiellement du type de vol défini par la suite :

- **Vol à vue :** ce vol doit être réalisé à une distance horizontale entre le pilote et le drone inférieure à 100 mètres.
- **Vol hors-vue :** ce vol peut être réalisé à des distances horizontales supérieures à 100 mètres. Le pilote doit pouvoir voir, à travers un moniteur vidéo, ce que voit le drone et où il se situe.
- **Vol automatique :** le drone suit un plan de vol, calculé avant le vol. Le pilote n'intervient dans le vol que pendant le décollage et l'atterrissage.

Dès lors que le type de vol est connu, il faut encore connaître le lieu du vol. Il est ensuite possible de savoir à quel scénario le pilote va être confronté lors du vol. Voilà les 4 types de scénario :

- **Scénario S-1 :** il s'agit d'un vol à vue, dans une zone non-peuplée, ne comprenant ni humains, ni animaux. La distance entre le sol et le drone ne peut pas être supérieure à 150 mètres.
- **Scénario S-2 :** il s'agit d'un vol hors-de-vue, dans une zone non-peuplée. La distance entre le pilote et le drone ne peut pas être supérieure à 1000 mètres et la distance entre le sol et le drone ne peut pas être supérieure à 50 mètres.
- **Scénario S-2+ :** ce scénario est le même que le scénario S-2 à la différence que la hauteur de vol maximale est 150 mètres.
- **Scénario S-3 :** il s'agit d'un vol à vue, dans une zone peuplée. La distance entre le sol et le drone ne peut pas être supérieure à 150 mètres.
- **Scénario S-4 :** il s'agit d'un vol hors-de-vue, dans une zone non-peuplée mais il n'y a aucune contrainte concernant la distance entre le pilote et le drone. Cependant, le pilote doit être en possession du PPL avion ou hélicoptère (le brevet de pilote) et avoir effectué au minimum 100 heures de vol avec le drone utilisé.

La définition du terme « zone non-peuplée » se situe dans la partie 1.3 de l'annexe II de l'arrêté relatif à « *la conception des aéronefs civils qui circulent sans aucune personne à bord, aux conditions de leur emploi et sur les capacités requises des personnes qui les utilisent*». Une zone non-peuplée est une zone « hors agglomération » et hors de « la proximité d'un rassemblement de personnes ou d'animaux ». Selon l'article 2 de l'arrêté du 11 avril 2012 relatif à « *l'utilisation de l'espace aérien par les aéronefs qui circulent sans personne à bord* », une agglomération est représentée « sur les cartes aéronautiques en vigueur diffusées par les services d'information aéronautique ». Il faut donc se référer à ces cartes pour savoir dans quel scénario va se dérouler le vol, et dans le cas où le vol se déroule

en zone non-peuplée, s’assurer qu’aucun troupeau d’animaux ne se trouve dans la zone de vol.

2.3 Les équipements de sécurité

Comme les drones sont encore considérés comme une nouvelle technologie et qu'ils ne sont utilisés que depuis peu de temps dans le secteur civil, le gouvernement français doit s'assurer qu'ils soient utilisés de manière à ce que la sécurité de tous soit assurée. Le fait qu'un tel engin puisse être utilisé dans des zones peuplées, comme dans des festivals de musique au-dessus des gens par exemple, implique qu'il faut pouvoir garantir la sécurité de ces personnes. Voilà pourquoi un certain nombre d'équipements sont nécessaires pour obtenir l'autorisation de voler avec un drone :

- **Capteurs barométriques :** ils permettent au pilote de connaître en temps réel l'altitude du drone par rapport au sol.
- **Dispositif limitant l'altitude du drone :** il permet de s'assurer que le drone ne dépasse pas les limites de distances fixées par le scénario du vol.
- **Dispositif "failcrash" :** il permet de forcer le drone à atterrir lorsqu'il dépasse les limites de distance définies par le scénario de vol. Ce dispositif doit fonctionner même lorsqu'une coupure de la liaison radio entre le pilote et le drone apparait.
- **Dispositifs de protection des personnes au sol :** ce dispositif ne concerne que les drones de la catégorie E. Il permet de limiter l'impact au sol et se déclenche, soit sur demande du pilote, soit lors de l'activation du dispositif "Fail-Safe".
- **Dispositifs de navigation :** le pilote doit pouvoir connaître la position et la direction de son drone à n'importe quel moment du vol. Le drone doit alors être équipé d'une caméra positionnée vers l'avant du drone.

L'exploitant doit remplir une déclaration de conformité et procéder à une certification de son drone précédée par une démonstration pour que l'administration lui accorde le droit de voler avec son drone.

2.4 Les documents administratifs

Pour toujours respecter la loi, un certain nombre de documents administratifs sont à fournir à l'administration pour obtenir l'autorisation de voler, peu importe le scénario :

- **Une licence de pilote**
- **Un manuel d'activité particulière (MAP)** décrivant le déroulement du vol, les méthodes utilisées ainsi que les dérogations et autorisations obtenues pour chaque vol.
- **Une Déclaration de Niveau de compétence du pilote** émise par l'exploitant du drone. Elle permet de vérifier que le pilote a assez d'expérience pour tel ou tel scénario.
- **Une Déclaration de conformité du drone**

- **Une démonstration** permettant de vérifier le fonctionnement des dispositifs de sécurité avant d'obtenir les certifications adéquates.

Selon le type de vol et le scénario, il y a encore d'autres documents officiels à remplir ou à obtenir avant de pouvoir voler. Par exemple, l'exploitant doit pouvoir présenter un manuel d'utilisation du drone, une Déclaration d'activités aériennes si de précédents vols ont déjà eu lieu, ou encore une attestation d'assurance professionnelle.

2.5 Conclusion sur l'étude législative

Tous ces documents à présenter sont la preuve que les drones, dans le secteur civil, ne doivent pas être utilisés par n'importe qui car ils peuvent être dangereux pour autrui. Légaliser une nouvelle technologie n'est pas une mince affaire et nous le ressentons bien dans la quantité de documents à remplir.

Remplir les documents officiels est la première étape avant de pouvoir voler avec un drone et cependant, cela peut être un frein aux petites entreprises qui le font pour la première fois ou qui n'utilisent pas leur drone assez souvent.

Cette partie avait pour but de clarifier les termes à connaître et donner les principaux éléments à remplir pour obtenir une autorisation de vol. Une fois tous ces éléments remplis, il faudra encore obtenir l’autorisation de vol pour chaque vol que l’exploitant désire réaliser.

3 Le drone : un hexacoptère DJI S800

3.1 Description du DJI S800

Le drone DJI S800 est un drone fabriqué par DJI Innovation. Il est associé à une nacelle 2 axes CF V2 et un système de pilote automatique Wookong M aussi fabriqué par DJI Innovation.

Structure du DJI S800

Son poids au décollage varie entre 5 et 7 kilogrammes en fonction des capteurs et des batteries embarqués. Il ne satisfait donc les conditions de vol que pour les scénarios S-1, S-2 et S-2+ (voir Annexe A). Cependant, son envergure de 1,18 mètres lui confère une grande stabilité en vol et ses 6 bras détachables permettent de le transporter aisément. Le fait qu'il ait été conçu parallèlement au système de pilote automatique Wookong M par DJI Innovation permet d'avoir un drone qui réagit parfaitement aux commandes et au pilote. De plus, ses 6 bras lui permettent de voler, même en cas de panne d'une des hélices.

3.2 Description du Wookong M

Le Wookong M est un système de pilote automatique développé par DJI Innovation. Il a été conçu pour faciliter l'utilisation des drones grâce à de nombreuses fonctions de sécurité. Ce système est composé d'un contrôleur principal, d'une centrale inertielle incluant un accéléromètre 3 axes, un gyroscope 3 axes et un baromètre, d'un GPS, d'un système de gestion de l'alimentation et d'une LED. Le logiciel qui est fourni avec ce système permet de paramétrer l'ensemble des commandes et des fonctions du Wookong M. La LED est très utile car elle permet, en fonction de la couleur et de la vitesse de clignotement, de connaître les paramètres de vol du drone (voir Annexe B). La centrale inertielle permet de compenser et stabiliser les mouvements de la nacelle 2 axes lorsque le drone se déplace. Selon l'entreprise DJI, il est possible d'attendre une précision de 2° quant à la compensation de la nacelle. Ce système est donc très complet et parfait pour la prise en main d'un drone.

Cependant, les données récupérées par le Wookong M ne sont pas exportables et ne servent au système de pilote automatique qu'à rester stable durant le vol. Il est donc impossible de lui fournir un plan de vol qu'il suivra sans intervention du pilote. Nous avons alors exploité les autres ressources dont dispose ce système de pilote automatique pour l'adapter à la photogrammétrie. Nous allons détailler par la suite quelques-uns des paramètres principaux de ce système qui sont très utiles pour le vol photogrammétrique, et d'autres qui sont nécessaires au respect de la législation.

3.2.1 Paramètres utiles pour la photogrammétrie

Il arrive que le drone ne soit pas totalement stable en vol dû aux répartitions des charges sur celui-ci (appareil photo ou caméra de poids différents, positionnement des batteries ou des éléments électroniques,…). Le centre de gravité du drone peut alors varier en fonction de l'utilisation que l'on veut en faire. Le premier paramètre utile pour le vol photogrammétrique est alors le réglage des « trims ». Les trims sont des commandes permettant d'ajuster l'attitude et les réactions du drone en vol. Il y en a 4, un pour chaque déplacement possible prévu (déplacements horizontaux selon X et Y, déplacement vertical selon Z et rotation autour de Z). Un bon réglage des trims consiste à ce que le drone en vol ne se déplace pas sans l'intervention du pilote sur les manettes de la radiocommande. Concrètement, ce réglage agit comme un compensateur sur les moteurs des 6 hélices qui tourneront plus ou moins vite les unes par rapport aux autres, et ajusteront ainsi les déplacements du drone.

Il est ensuite possible de voler selon différents modes de contrôle. Ces modes de contrôle permettent d'être plus ou moins assisté par le Wookong M lors du vol du drone. Il existe 3 modes de contrôle différents : le mode manuel, le mode Attitude et le mode GPS Attitude. Chaque mode de contrôle a ses avantages et ses inconvénients qu'il faudra choisir en fonction de la zone de vol et de l'utilisation que l'on veut faire du drone. Le tableau suivant récapitule les caractéristiques de chaque mode de contrôle.

Modes de contrôle du WKM			
	Mode GPS Atti.	Mode Atti.	Mode Manuel
Fonctions du stick de commande	Multiple contrôle d'attitude, Sticks au centre pour 0° d'attitude, maxi 35°		Vitesse maxi de rotation: 150°/s. Pas de limitation d'angle d'inclinaison et de vitesse verticale.
Linéarité de commande	OUI		
Stick relâchés	Verrouillage position lorsque signal GPS suffisant	Stabilisation uniquement de l'attitude	PAS Recommandé
Verrouillage d'altitude	Maintien la meilleure altitude à partir d'un mètre du sol		NON
Perte de GPS	Après 10s de perte du signal GPS, le système passe en mode Atti. Automatiquement.	Stabilisation seule sans verrouillage de position	.....
Sécurité	Le mixage entre l'attitude et la vitesse assure la stabilité, Fail-Safe avancé		Dépend de l'expérience
Usage	Photographie	Sport et loisirs	

Tableau 1 : Mode de contrôle du Wookong M (source : notice d'utilisation du Wookong M)

Il est peu recommandé pour un novice de voler en mode manuel car le système Wookong M ne réagira pas en cas de problème. Le mode Attitude permet de stabiliser le drone à une altitude si le pilote relâche toutes les commandes mais il continuera de se déplacer horizontalement. Le mode GPS Attitude permet quant à lui, de maintenir l'altitude et la position si le pilote relâche toutes les commandes. Il est donc préférable pour un débutant d'utiliser les modes GPS Attitude ou Attitude si le GPS ne fonctionne pas.

Le pilotage du drone est une tâche complexe qui nécessite de l'entraînement, car le drone se déplace selon un repère (X,Y,Z) qui lui est propre. Si l'avant du drone est fixé vers le pilote, les commandes seront alors inversées. Lorsque le pilote voudra que le drone se rapproche de lui, il devra pousser la commande du déplacement horizontal vers l'avant. Il en va de même lorsque le drone regarde vers la droite ou la gauche par rapport au pilote.

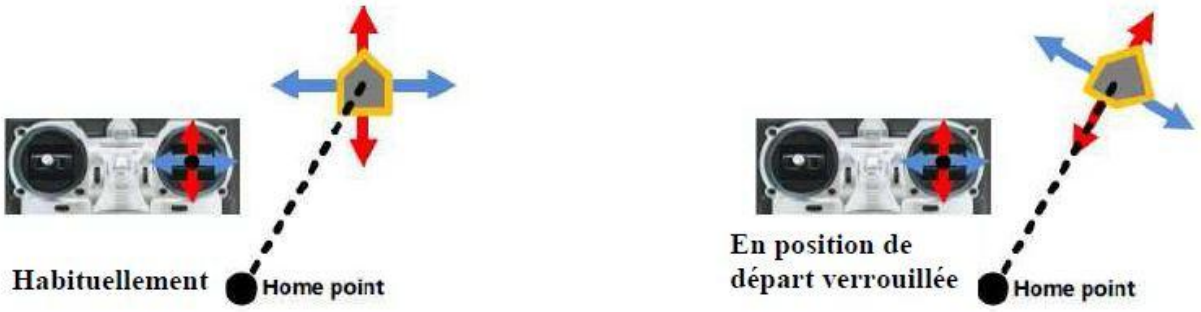
Le système de pilote automatique Wookong M intègre alors 3 modes de vol : le mode normal, le mode « course verrouillée » et le mode « position verrouillée ». Le mode normal est celui décrit précédemment, lorsque le pilote pousse la commande du déplacement horizontal vers l'avant, le drone avancera selon sa direction vers l'avant.

Le mode « course verrouillée » permet d'enregistrer la direction vers l'avant du drone au décollage. Ce sera alors cette direction qui sera prise en compte lorsque le pilote appuiera sur la commande pour déplacer le drone vers l'avant.

Fonctionnement du mode « course verrouillée »

Ce mode est très utile pour effectuer un quadrillage comme pour de la photogrammétrie aérienne de longue portée. Peu importe la direction du drone, il se déplacera toujours selon les mêmes directions. Il faut toutefois que la boussole du Wookong M soit correctement calibrée. Ce mode de vol fonctionne en mode Attitude ou GPS Attitude.

Le mode « position verrouillée » permet de se repérer par rapport à une position enregistrée. Cette position est d'origine la position d'où a décollé le drone mais elle peut être modifiée durant le vol pour pouvoir se repérer à un autre point qui serait mieux situé, comme dans le cadre du survol d'un bâtiment dont le centre n'est pas accessible à pied. La direction vers laquelle se déplacera le drone sera toujours comparée à ce point enregistré.



Fonctionnement du mode « position verrouillée »

Ce mode est utile lorsque le pilote veut tourner autour d'un même objet. Il ne fonctionne qu'en mode GPS Attitude.

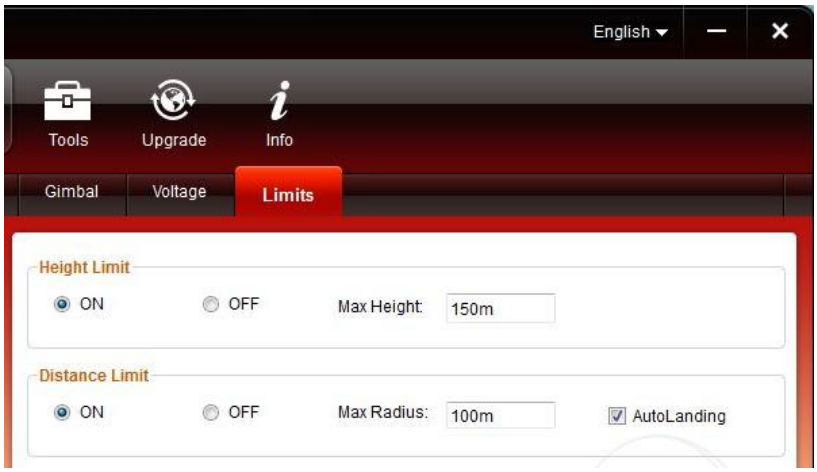
Comme pour le mode de contrôle, il faut choisir le mode de vol en fonction de l'utilisation que l'on veut faire des prises de vue et du projet en cours.

Enfin, il faut savoir que la durée de vol des drones est relativement limitée. C'est pourquoi, il est possible de régler deux niveaux d'alerte qui vont se déclencher une fois que les batteries auront atteint un certain seuil. Cela se matérialise par un clignotement jaune de la LED puis un clignotement rouge lorsque le deuxième seuil est atteint. Les deux seuils sont ajustés de manière à ce que le pilote ait le temps de faire revenir le drone pour le poser dans une zone sans danger.

3.2.2 Paramètres nécessaires au respect de la législation

Le système de pilote automatique permet de respecter la législation concernant le dispositif limitant l'altitude du drone ainsi que le dispositif « Failcrash ».

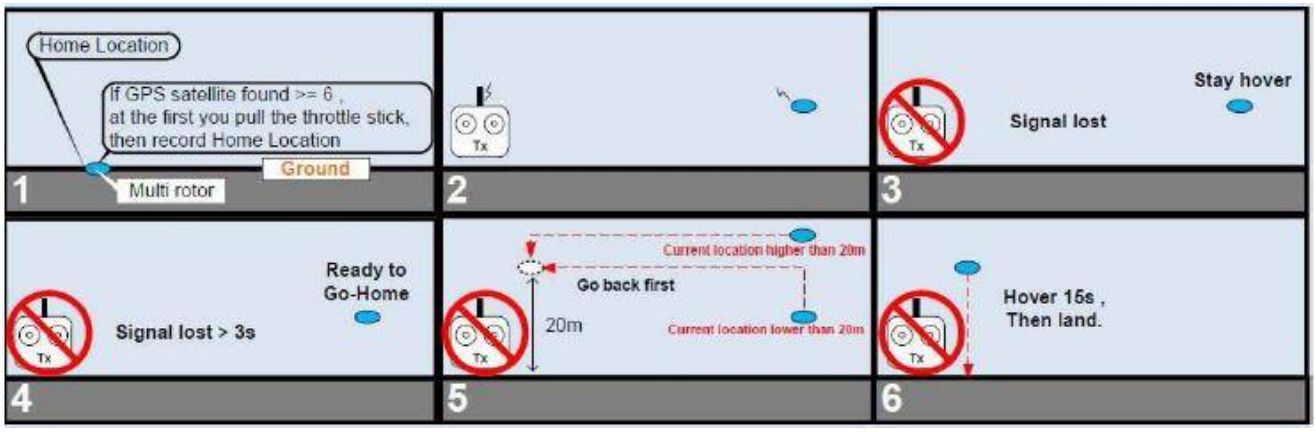
Grâce au logiciel fourni avec le Wookong M, il est possible de fixer des limites d'altitude et de distance qui permettront au drone de rester dans la zone de vol légale.



Limites appliquées dans le cadre d'un scénario S-1

Sur cette capture d'écran du logiciel, la limite d'altitude est de 150 mètres par rapport au sol et la limite de distance horizontale est de 100 mètres par rapport au point de décollage. Ces paramètres permettraient alors de voler dans le cadre d'un scénario S-1. Si une des limites est dépassée, le drone entrera en mode Fail-Safe.

Le mode Fail-Safe permet de respecter la législation par rapport au dispositif « Failcrash ». C'est une fonction qui permet au drone d'atterrir automatiquement tout en revenant à son point de départ. Ce mode a été programmé pour se déclencher automatiquement lorsque le drone rencontre un problème, comme une perte de liaison radio avec le pilote, ou que le pilote le déclenche manuellement. En cas de perte de signal radio avec le pilote, le mode Fail-Safe fonctionne de la manière suivante :



Si le signal radio entre le pilote et le drone est rétabli avant la fin de la procédure Fail-Safe, la procédure s'arrête et le pilote peut à nouveau diriger le drone. Ce système présente toutefois un inconvénient : si le drone revient automatiquement, il ne pourra pas détecter les obstacles éventuels comme des lignes électriques ou des arbres qui pourraient se trouver sur son chemin. Encore une fois, le vol de drone n'est pas sans risque. Les erreurs sont difficilement rattrapables et les conséquences peuvent être très importantes. Il faut donc être prêt à toutes éventualités.

3.3 Description de la radiocommande Graupner MC-32

La radiocommande MC-32 est développée par l'entreprise allemande Graupner. Elle a été conçue en premier lieu pour les compétitions de voltige d'aéromodélisme. Cependant, son utilisation pour les vols photogrammétriques est tout à fait possible et avantageuse du fait de ses nombreuses commandes entièrement programmables.

Radiocommande Graupner MC-32

Hormis les boutons « SET » et « ESC », tous les éléments visibles sur la photo ci-dessus sont programmables. Il est alors possible de gérer l'inclinaison de la nacelle, de déclencher un chronomètre pour enregistrer des données de vol comme la position GPS ou l'altitude, de changer de mode de contrôle ou de mode de vol durant le vol. Après plusieurs tests en vol, chaque bouton et interrupteur ont été paramétrés de manière à ce que la combinaison avec le système de pilote automatique Wookong M soit des plus intuitives et optimales pour le vol photogrammétrique (voir Annexe B).

3.4 Les éléments optionnels du drone

Les éléments décrits par la suite sont des éléments qu'il est possible de rajouter sur l'hexacoptère DJI S800 comme sur d'autres drones. Etant limité dans les travaux que la législation nous autorise à effectuer du fait de la grande envergure, du poids (drone de catégorie E d'environ 6kg) et des travaux que nous voulons réaliser avec ce drone, nous n'avons pas rajouté ces éléments sur celui-ci.

3.4.1 Un parachute de secours

Dans le cas des drones de la catégorie E (voir 3.1 Les différentes catégories de drones) qui pèsent moins de 4kg, il leur est possible de voler dans le cadre d'un scénario S-3, à condition que celui-ci soit équipé d'un dispositif de protections des personnes au sol. Ce dispositif correspond le plus souvent à un parachute qui s'ouvre en cas de problème. Selon la législation, il doit pouvoir limiter la force de l'impact au sol à 69 Joules maximum.

3.4.2 Un kit de transmission vidéo

Dans le cadre de scénario S-2 ou S-2+, il est nécessaire d'obtenir un retour vidéo de la part du drone. En effet, si le drone vole à 500 mètres du pilote, ce dernier ne le verra plus et pourra donc difficilement le diriger. Il existe alors des kits de transmissions équipés d'émetteurs et de récepteurs radio ainsi que d'un moniteur vidéo. Ces éléments font partis des dispositifs de navigation à avoir en dehors des scénarios S-1 et S-3.

4 Choix de l'appareil photo

Le choix de l'appareil photo faisait partie de mes attributions pour ce Projet de Fin d'Etudes. Il y avait différentes solutions pour ce choix. La première consistait à utiliser la caméra GoPro déjà disponible dans le cabinet, mais il faut alors trouver un logiciel qui soit capable de corriger les distorsions dues au grand angle de la caméra. La seconde option consistait à acheter un appareil photo qui présente un minimum de distorsion pour que la recherche du logiciel adéquat soit simplifiée. Nous avons effectué plusieurs tests pour chacune de ces solutions afin de choisir la solution la plus adaptée à notre problème.

4.1 La caméra GoPro

La caméra GoPro est une mini caméra très prisée des sportifs d'extérieurs pour sa légèreté, ses images de très bonne qualité avec son grand angle et sa résistance. Elle est fournie avec différents accessoires qui permettent de l'emmener partout, que ce soit dans les airs ou sous la mer.

Une caméra GoPro dans son boitier étanche

L'intérêt de cette caméra est, dans le cadre d'une prise de vue avec un drone, sa légèreté et sa petite taille qui permettra de voler plus longtemps avec le drone par rapport à un appareil photo plus lourd. Elle dispose aussi d'un mode de prise de vue automatique, qui permet de prendre des photos à intervalle régulier. De plus, son boîtier lui fournit une grande résistance que n'ont pas les autres appareils photos, ce qui est très utile pour le vol de drone qui peut chuter.

Cependant, son grand angle de 11 millions de pixels n'en fait pas du tout un appareil photo conçu pour la photogrammétrie du fait des distorsions appliquées sur les images. Durant mon Projet de Recherche Technologique (PRT), j'avais essayé de corriger les distorsions de telles images en utilisant le logiciel de photogrammétrie Photomodeler, sans succès.

Depuis plusieurs années, Autodesk s'est lancé dans la conception de logiciel gratuit pour de la modélisation 3D, que ce soit de la modélisation artistique, technique ou

photogrammétrique. Le premier logiciel était 123D Catch, qui permet de faire de la photogrammétrie de base sur des objets assez simples. Le deuxième logiciel photogrammétrique conçu par Autodesk est Recap 360. Celui-ci est déjà plus avancé car il fournit des fonctionnalités comme la correspondance de points topographiques entre les différentes photos ou, justement, la correction des distorsions sur les images d'une caméra GoPro. Enfin, Autodesk a sorti une version bêta d'un dernier logiciel photogrammétrique, Memento, qui est plus axé sur le traitement du modèle 3D.

Ce deuxième logiciel paraît donc parfait pour l'utilisation de la GoPro dans le cadre de vol de drone. Pour vérifier qu'il fonctionne correctement, nous avons effectué plusieurs essais.

4.1.1 Test de modélisation sur un petit objet

Nous avons tout d'abord essayé la modélisation 3D d'un petit objet pris en photo avec la caméra GoPro. Nous avons effectué plusieurs cercles de photos autour de l'objet à différentes hauteurs, comme dans le cadre d'un cas d'école. Voilà une des photos, sur laquelle on peut voir les distorsions causées par le grand angle de la caméra.

Photo de l'objet pris avec la caméra GoPro

On peut voir sur cette photo que les bords de la photo sont tordus et qu'il va falloir les corriger.

Nous pouvons voir sur l'image suivante que le logiciel arrive à corriger les distorsions :

Photo corrigée de l'objet pris avec la caméra GoPro

Cependant, la modélisation de cet objet n'est pas exploitable, comme nous pouvons le voir sur l'image suivante :

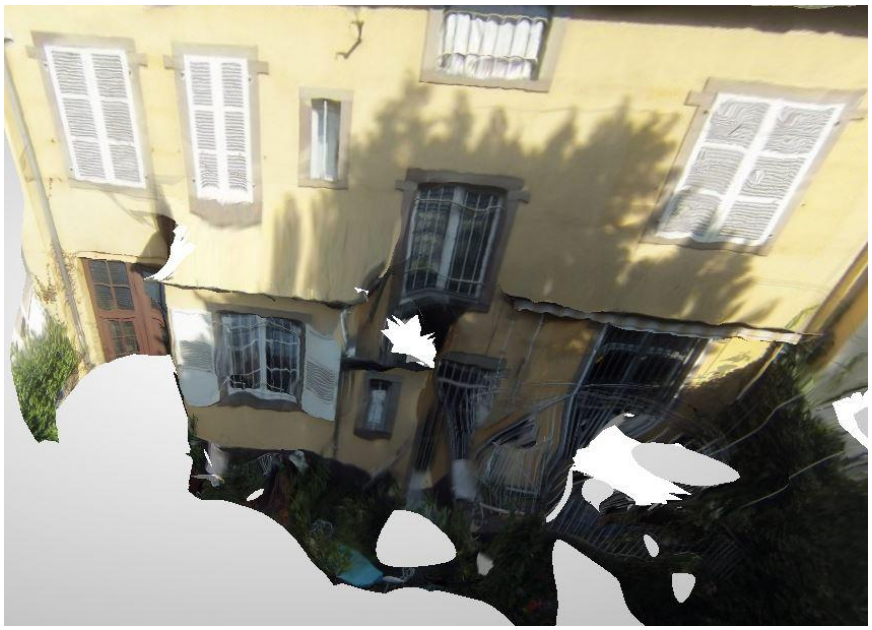
Résultat de la modélisation 3D

L'objet est totalement déformé et présente des incohérences de constructions (dédoublement de l'objet, déformations, mauvais positionnement) au niveau de l'objet mais aussi de la scène autour de cet objet.

Nous n'avons pas d'information sur la méthode de calcul du modèle 3D et nous ne pouvons donc donner une explication correcte à ce problème, mais nous pouvons toutefois supposer que l'objet est trop proche de la caméra GoPro qui n'est pas conçu pour prendre des photos en mode macro. Voilà pourquoi nous avons essayé sur un objet plus grand et plus éloigné que celui-ci.

4.1.2 Test de modélisation sur une façade de bâtiment

Nous avons essayé de modéliser la façade d'un bâtiment en prenant des photos parallèlement à cette façade. De la même manière que vue précédemment, le logiciel Recap 360 va corriger les distorsions et calculer le modèle 3D.



Résultat de la modélisation 3D de la façade

Comme nous pouvons le voir sur l'image ci-dessus, la partie supérieure de la façade paraît correctement modélisé. Cette partie est plane, ce qui n'est pas le cas de la partie inférieure. La partie inférieure est moins bien modélisée et présente des incohérences.

4.1.3 Test en vol

Nous avons tout de même essayé de faire des tests en vol avec la caméra GoPro. Cependant, il existe un effet qui détériore la qualité des photos appelé « effet jello ». Cet effet déforme les objets pris en photo comme sur la photo suivante où les bandes blanches ne devraient pas présenter ces petites vagues :

Illustration de « l'effet jello »

Cet effet est dû aux vibrations du drone lors du vol. Il peut être atténué en équilibrant les hélices et l'ensemble de la charge utile ou en améliorant les suspensions entre la caméra GoPro et la nacelle. Mais cet effet ne disparaîtra pas complètement malgré toutes ces améliorations, ce qui causerait des erreurs dans la création du modèle 3D.

Nous avons appris plus tard que la version Silver de la caméra GoPro n'était pas encore supportée par le logiciel, et seule la caméra GoPro Black pouvait être utilisée avec ce logiciel pour le moment.

4.2 Les appareils photo présentant un minimum de distorsions

4.2.1 Les critères de sélection

Pour choisir un appareil photo, il a fallu établir une liste de critères à respecter, en tenant compte des caractéristiques de vol du drone, de la précision attendu et de la méthodologie à appliquer durant le vol.

Le facteur économique a bien évidemment été pris en compte lors du choix de l'appareil photo. Cependant de nombreux autres facteurs ont été très importants.

Le critère le plus important dans le choix de l'appareil photo est la taille du boîtier. En effet, il faut que l'appareil photo puisse être fixé à la nacelle dont les dimensions sont assez réduites. La taille maximale du boîtier pouvait alors être 11,4 centimètres en hauteur et 13 en largeur. A cause de ce simple critère, la majorité des appareils photo reflex et bridge ont été exclus car trop volumineux. Il a donc fallu choisir parmi les appareils photo hybrides ou les compacts.

Il a ensuite fallu tenir compte des distorsions qui peuvent varier d'un appareil photo à l'autre. La plupart des logiciels open-source ne corrigent pas les distorsions appliquées aux photos par les objectifs, nous avons donc choisi un appareil qui présentera un minimum de distorsions.

Pour des raisons de commodité lors du vol, une fonction « prise de vue à intervalle régulier » est préférable. Cela permettra de ne s'occuper que du drone durant le vol sans s'occuper de la prise de vue.

Nous avons tenu compte de la taille du capteur pour avoir une qualité d'image optimale, en considérant la focale équivalente 24x36. On parle de notion de « focale équivalente 24x36 » pour connaître la focale de l'appareil photo si le capteur était de dimension 24x36. Cela nous a permis d'avoir un élément de comparaison entre tous les appareils photos, quelque soit leur taille de capteur ou focale.

Enfin, nous avons pris en compte le poids de l'appareil photo. Plus l'appareil photo sera lourd, plus les batteries du drone vont se décharger rapidement et le vol sera moins long.

4.2.2 L'appareil photo choisi : Olympus PEN E-PM1

En tenant compte de tous ces critères, nous avons choisi, parmi un large choix d'appareils photos, l'Olympus PEN E-PM1, un appareil photo hybride de 12,3 millions de pixels. La taille de son capteur est 13x17,3 centimètres et son poids est d'environ 400 grammes avec l'objectif. Associé à son objectif, un Olympus M Zuiko 14-42mm, il permet d'obtenir une taille de pixel au sol inférieure à 2 centimètres pour un vol à une hauteur de 50 mètres.

L'Olympus PEN E-PM1 et son objectif

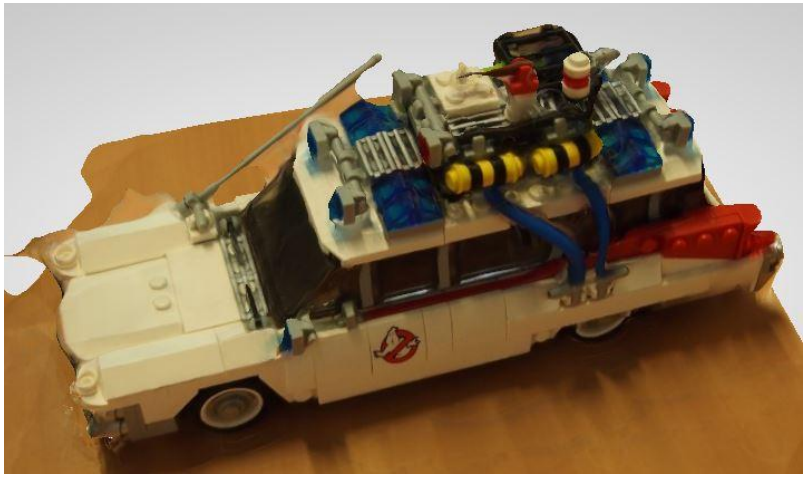
Cependant, cet appareil photo possède un inconvénient. La fonction « prise de vue à intervalle régulier » ne fonctionne que lorsque l'utilisateur reste appuyé sur le bouton

déclencheur, ce qui n'est pas possible lors d'un vol de drone. Pour résoudre ce problème, une télécommande qui se branche sur l'appareil photo est utilisée. Cette télécommande permet de bloquer le bouton déclencheur pour que l'appareil photo continue de prendre des images durant le vol.

Comme pour la caméra GoPro, nous avons effectué quelques tests au sol avant les tests finaux à bord du drone.

4.2.2.1 Test de modélisation sur un petit objet

Comme les distorsions sont minimes, le logiciel Recap 360 n'a plus de problèmes de calculs entre les différentes photos et le modèle 3D semble correct, malgré quelques imperfections. Mais ce résultat est bien meilleur que le résultat de la modélisation 3D réalisée à partir des photos de la caméra GoPro.



Résultat de la modélisation 3D

4.2.2.2 Test de modélisation sur une façade de bâtiment

Là aussi, l'absence de distorsions sur les images facilite le calcul et la façade semble bien modélisée.

Résultat de la modélisation 3D de la façade

La façade du bâtiment est et on peut voir un renfoncement au niveau des fenêtres. La partie qui sort en bas de la façade semble parallèle à la partie arrière. Cependant, il y a un manque d'informations au-dessus de cette partie d'où les trous dans le modèle. De plus, le manque de recul n'a pas permis de prendre suffisamment de photos des parties perpendiculaires à la façade.

4.2.2.3 Test en vol

Nous avons finalement effectué des tests en vol pour vérifier que l'appareil photo fonctionne correctement en vol et qu'il ne soit pas perturbé par les vibrations des hélices lors du vol. Nous avons effectué un vol dans une clairière relativement plate et abritée du vent pour faciliter le vol.

Modèle 3D de la clairière

Le modèle 3D que nous obtenons semble correct malgré le manque de différence des couleurs du sol. Cependant les arbres qui se situent autour du terrain et au milieu (les deux tâches blanches situées au milieu de l'image) sont mal modélisés par manque d'informations. De plus, le modèle correspond relativement bien à la réalité. Toutefois, ce contrôle n'est que visuel et nous n'avons aucune idée sur la précision d'un point. Ces premiers tests en vol sont donc une réussite, mais d'autres tests permettant de vérifier l'exactitude de nos résultats ont été réalisés par la suite.

4.3 Conclusion sur le choix de l'appareil photo

La caméra GoPro est la solution la plus simple à mettre en place du fait de sa taille, son poids et sa qualité d'image. Cependant, les logiciels permettant d'utiliser la caméra GoPro ne sont pas encore fiables et les résultats des modélisations que nous avons obtenues avec cette caméra sont trop éloignés de la réalité pour conserver cette solution.

Parmi les différents appareils photo que nous avons comparé, l'appareil photo Olympus PEN E-PM1 et son objectif sont ceux qui remplissent le mieux les critères que nous avons définis.

Nous avons donc choisi l'appareil photo Olympus PEN E-PM1 pour réaliser ce projet.

5 Constitution du dossier pour la demande de vol

A partir du moment où nous connaissions tous les éléments qui allaient constituer le drone et la charge utile, il a fallu monter le dossier pour obtenir les autorisations de vol délivrées par la Direction de la Sécurité de l'Aviation Civile (DSAC). Les documents à remplir et à fournir dans le dossier diffèrent selon le scénario de vol que l'on veut effectuer.

Nous avons décidé, dans un premier temps, de ne faire la demande que pour le scénario S-1 car nous n'avions pas tous les éléments de sécurité nécessaires au vol en scénario S-2. De plus, le temps nécessaire à la constitution de ce dossier est considérable, ce qui a pour but de décourager une partie des personnes qui veulent se lancer dans le domaine du drone.

Les éléments constitutifs du dossier pour un scénario S-1 (developpement-durable.gouv.fr, [2014]) sont les suivants :

Le télépilote doit :

- disposer d'un **certificat d'aptitude théorique** d'une licence de pilote d'aéronef habité (voir Annexe C)
- suivre une **formation pratique** qui peut être réalisé en auto-entraînement ou dans un organisme de formation ayant déposé un Manuel d'Activité Particulière (MAP)
- recevoir de la part de l'exploitant du drone une **déclaration de niveau de compétence** (DNC) (voir Annexe D)

Le drone doit :

- disposer des **équipements de sécurité** requis par chaque scénario
- disposer d'un **dossier d'utilisation** explicitant chaque étape avant, pendant et après le vol, dans toutes les situations envisageables (voir Annexe B)
- être conforme à la législation selon une **attestation de conformité navigabilité** (voir Annexe E)

L'exploitant du drone doit :

- rédiger un **Manuel d'Activité Particulière** (MAP)
- rédiger une **déclaration de conformité de l'exploitant** attestant qu'il respecte les lois en vigueur (voir Annexe F)

Tous les éléments constitutifs de ce dossier ont été archivés de manière à avoir un justificatif du respect de la réglementation en cas de problème.

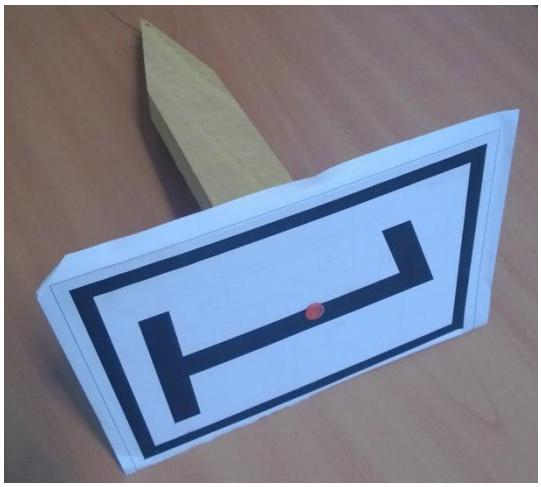
Le document le plus important et le plus complexe est le manuel d'activité particulière. Ce document permet à la DSAC de vérifier que l'exploitant a mis en place un ensemble de protocole, de procédures, de vérifications et de matériels pour respecter la législation dans tous les cas de figure possibles. Lorsque ce document est conforme à la législation en vigueur, la DSAC fournit à l'exploitant une attestation de dépôt de MAP (voir Annexe G)

6 Méthodologie appliquée pour les vols

Cette partie n'explicite pas les phases avant et après le vol (voir Annexe B). Nous allons cependant différencier les phases de vol pour la modélisation d'un MNE et pour la modélisation d'un bâtiment, même si nous n'avons pas les autorisations pour effectuer un tel vol.

L'hexacoptère DJI S800 ne dispose pas d'un mode de vol automatique. Ce mode permet de programmer un plan de vol dans le logiciel du drone pour qu'il le suive et ait directement les photos souhaitées. L'objectif pour le pilote du DJI S800 est donc de réaliser un vol permettant de recouvrir correctement la zone ou l'objet à modéliser.

Toutefois, certaines actions ne vont pas changer quelque soit l'objet à modéliser. De plus en plus de logiciels gratuits de photogrammétrie offre la possibilité d'ajouter des points connus en coordonnées sur les différentes photos. Cela permet d'aider le logiciel à calculer le modèle 3D et de le mettre à la bonne échelle. Il a donc été décidé de créer des cibles distinctives les unes des autres avec un point reconnaissable sur chacune d'entre elles.



La cible numéro 1

Ces cibles sont composées d'une plaque sur laquelle est imprimé un chiffre allant de 1 à 8, le numéro 9 n'a pas été créé pour éviter les erreurs avec le numéro 6. Dans le cadre de la modélisation d'un MNE, ces plaques sont fixées à des piquets en bois à l'aide d'un clou peint en rouge. Cela permettra de les planter dans le sol de manière stable. Dans le cadre de la modélisation d'un bâtiment, il faudra prévoir un plus grand nombre de cibles, au minimum 4 par façade. Elles seront fixées au mur du bâtiment avec du scotch et le clou rouge sera remplacé par une pastille de couleur.

Comme la prise de vue est automatique et à intervalles réguliers, le pilote n'a pas besoin de s'en occuper. Cependant, nous avons quand même dû vérifier que l'intervalle que nous allons choisir suffise pour obtenir assez de recouvrements entre les photos adjacentes. Pour calculer cet intervalle, nous utilisons les formules suivantes (Kraus, K. & al [1998]) :

$$Facteur\ d'échelle\ de\ la\ photo : m_b = \frac{h}{c}$$

$$Longueur\ du\ côté\ de\ la\ photo\ au\ sol :\ S_L =\ \ s_L * m_b$$

$$Longueur\ de\ base\ pour\ un\ recouvrement\ longitudinal\ de\ l\% : B = S_L\ * \left(1 - \frac{l}{100}\right)$$

$$Longueur\ de\ base\ en\ fonction\ du\ temps : B = \frac{V}{T}$$

Avec h : la hauteur de vol (30 mètres)
c : la distance focale de l'appareil photo Olympus E-PM1 (14 millimètres)
s_L : longueur du capteur de l'appareil photo (17,3 millimètres)
V : la vitesse du drone (10 mètres par seconde)
T : le temps entre deux photos (en secondes)

On obtient alors la formule :

$$T = \frac{V}{B} = \frac{V}{S_L\ * \left(1 - \frac{l}{100}\right)} = 1{,}08s$$

Pour avoir un recouvrement longitudinal d'environ 75 % entre chaque photo à une hauteur de vol de 30 mètres et une vitesse de 10 mètres par seconde, des photos seront prises toutes les secondes. Une fois que l'inclinaison de la nacelle permettant de gérer l'angle des prises de vue est bonne, le pilote n'a plus qu'à faire survoler la zone par le drone.

6.1 Vol pour la modélisation d'un MNE

Un Modèle Numérique d'Elévation est un modèle 3D censé représenter le terrain mais aussi la canopée et le sur-sol. Il faut appliquer des traitements plus poussés que ceux utilisé dans ce projet pour obtenir un Modèle Numérique de Terrain.

Dans le cadre d'un vol pour la modélisation d'un MNE, il faut commencer par planter les cibles dans le sol de manière homogène sur toute la surface du terrain à modéliser. La meilleure façon est de placer les cibles en quinconce, si possible à des altitudes différentes, pour recouvrir la plus grande surface possible. Une fois que les cibles ont été mises en place, un rapide levé au tachéomètre ou au GPS de ces cibles doit être effectué.

Pour la suite, plusieurs méthodologies de vol ont été envisagées. La première méthodologie envisagée est la plus simple. Comme l'appareil photo prend automatiquement des photos à intervalles réguliers, cette méthodologie consiste à survoler la zone à modéliser de façon aléatoire. Sur un vol de 15 minutes environ, cela représente 900 photos, ce qui est amplement suffisant pour modéliser un terrain. Cependant, aucun logiciel gratuit ne peut utiliser autant de photos. Et sélectionner un nombre de photos défini dans ces 900 photos est une perte de temps car le modèle ne sera peut-être pas bien modélisé.

La seconde méthodologie envisagée est celle utilisée dans le cadre d'un vol pour de la photogrammétrie aérienne de longue portée. Il faut alors placer l'axe optique de l'appareil photo à la verticale du sol, puis le pilote dirige le drone de façon à former des bandes parallèles. Pour faciliter le pilotage du drone, et comme il peut voler dans toutes les directions contrairement à un avion, l'avant du drone sera dans la même direction tout au long du vol. Toutes les photos seront donc orientées selon la même direction. De plus, il est possible de tirer profit du système de pilotage automatique, le Wookong M, lors de ce vol en utilisant le mode « Course verrouillée ».

C'est cette seconde méthodologie que nous avons gardée dans le cadre d'un vol pour modéliser un MNE.

Une fois le levé terminé, le pilote doit se placer correctement pour pouvoir estimer les distances entre le drone et les éventuels obstacles présents sur le terrain durant le vol. Il peut ensuite décoller et stabiliser le drone à l'altitude voulue, grâce au mode Attitude du système de pilotage Wookong M. Quand le drone est stabilisé, le pilote fait pivoter la nacelle jusqu'à ce que l'axe optique de l'appareil photo soit environ à la verticale du terrain. Le vol se déroule ensuite de la même manière qu'un vol de photogrammétrie aérienne de longue portée. Le pilote devra décrire des bandes parallèles dans les deux directions du terrain pour avoir un maximum d'informations.

Cependant, le pilotage de drone reste une discipline compliquée. Il est donc à la charge du pilote d'effectuer ou non le vol en fonction des difficultés du terrain ou de la météo.

6.2 Vol pour la modélisation d'un bâtiment

Comme dans le cadre d'un vol pour la modélisation d'un MNE, le vol dans le cadre d'une modélisation d'un bâtiment commence par le placement des cibles sur les murs du bâtiment, au minimum de 4 cibles par façade. De même, on doit effectuer un levé tachéométrique pour connaître les coordonnées en 3D de chaque cible.

Selon la hauteur du bâtiment, le recul que l'on peut avoir par rapport au bâtiment et la position des cibles, il faudra peut-être effectuer plusieurs tours de photos autour du bâtiment, en faisant attention à ce qu'un tour ait assez de recouvrement avec les tours supérieurs et inférieurs. Un premier tour peut être effectué au sol, et les tours supérieurs vont être effectués avec le drone.

Dans ce cas aussi, plusieurs méthodologies ont été envisagées. La première consiste à voler autour du bâtiment comme on pourrait le faire autour d'un objet en formant des cercles à différents niveaux et différentes hauteurs. Le Wookong M permettrait en plus d'enregistrer un point situé environ au centre du bâtiment pour ensuite utiliser le mode « position verrouillée ».

La seconde solution envisagée consiste à prendre les photos nécessaires à la modélisation de chaque façade de bâtiment car cela permettrait de moins se déplacer, et donc d'éviter les accidents. Cependant, cette méthode nécessite plus de temps et les raccords entre les différentes façades peuvent présenter des problèmes de modélisation.

C'est donc la première solution que nous aurions gardé dans le cadre d'un vol pour la modélisation d'un bâtiment.

Le pilote devra placer la nacelle de façon à ce que l'axe optique de l'appareil photo soit le plus horizontal possible. Pour éviter des risques de chute élevée du drone, le premier tour réalisé sera celui situé le plus haut du bâtiment et on descendra au fur et à mesure. En effet, les risques de chute sont plus grands en fin de vol qu'en début, notamment à cause du déchargement rapide des batteries ou des obstacles qui peuvent se situer proches du sol.

7 Modélisation 3D

7.1 Les différents logiciels testés

Autodesk, développeur d'AutoCad et d'autres logiciels de DAO ou de CAO, développe depuis 2009 des logiciels gratuits spécialisés dans la modélisation 3D réunis sous le terme Autodesk 123D. Le premier logiciel s'appelait d'ailleurs Autodesk 123D, puis toute une suite de logiciels qui ont chacun leur particularité comme 123D Design, 123D Circuit ou 123D Catch ont suivi la lignée lancée par Autodesk 123D.

Ce dernier logiciel a été le premier logiciel gratuit d'Autodesk dont la particularité est la photogrammétrie. C'était à la base un logiciel simpliste de photogrammétrie, conçu pour le grand public. Puis quelques fonctionnalités ont été rajoutées au fil du temps comme l'ajout de points correspondants entre chaque photo. En 2013, Autodesk a sorti un nouveau logiciel photogrammétrique, Recap 360. Ce logiciel est principalement destiné au professionnel car les fonctionnalités qu'il propose sont bien plus avancées que celle de 123D Catch. Enfin, une version bêta d'un dernier logiciel est disponible depuis la fin de l'année 2013. Ce logiciel, appelé Project Memento pour l'instant, permet aussi de créer des modèles 3D à partir de photos, mais est plus orienté vers la manipulation et le travail sur des modèles 3D plutôt que leur création.

Il existe cependant d'autres logiciels photogrammétriques gratuits qui ne sont pas réalisés par Autodesk. Ces logiciels utilisent différentes méthodes de calculs et fournissent différentes fonctionnalités. Ils peuvent avoir été développés par des grands groupes de l'informatique comme par des universitaires qui ont peu de moyens. Ces logiciels sont alors plus ou moins bien réussis et faciles à utiliser.

Tous ces logiciels sont des logiciels gratuits qui utilisent le système de Cloud pour traiter les données. Il suffit alors à l'utilisateur de charger ces photos sur les serveurs du logiciel pour que celui-ci calcule le modèle 3D ou le nuage de points

Pour l'ensemble des logiciels décrits dans cette partie, nous avons d'abord choisi les logiciels à comparer en fonction des fonctionnalités qu'ils offrent puis nous avons effectué des tests avec le même jeu de données, un ensemble de plus de 700 photos d'une clairière. Ce jeu de données a été réalisé avec l'appareil photo Olympus PEN E-PM1 en prenant une photo toutes les secondes lors du vol à bord du drone.

Il n'a pas été possible d'utiliser les 700 photos issues du survol de la clairière à cause des capacités de calcul réduites de chaque logiciel. Il a donc fallu faire un choix dans les photos que nous allons utiliser pour calculer le modèle 3D. Parmi ces 700 photos, plusieurs jeux de données ont été réalisés avec un nombre de photos variable en fonction des capacités de calcul de chaque logiciel.

Le premier jeu de données réalisé est constitué de photos de différentes périodes du vol qui ne se suivent pas forcément mais qui permettent de voir l'ensemble de la clairière. Le

second jeu de données est constitué de photos prises toutes les 2 secondes sur une période du vol (une photo sur 2 parmi les 700 photos prises toutes les secondes). Un troisième jeu de données a été réalisé en faisant attention à voir l'ensemble du terrain et en renommant les photos pour que le recouvrement entre chaque photo adjacente soit suffisant. Cela permet de limiter les doublons et de faciliter le calcul du modèle 3D.

7.1.1 123D Catch

123D Catch (123dapp.com, [2014]) a donc été le premier logiciel photogrammétrique développé par Autodesk. Il a été conçu pour que tout le monde puisse l'utiliser et n'offre donc pas toutes les fonctionnalités que pourrait offrir un logiciel payant comme Photomodeler. Par exemple, 123D Catch ne peut pas utiliser plus de 70 photos pour la création du modèle 3D et présente une limite rapidement atteinte dans le calcul du modèle.

Selon le tutoriel disponible sur le site internet du logiciel 123D Catch, il faut effectuer des photos selon un cercle autour de l'objet à modéliser. Cependant, cette manière de procéder n'est pas obligatoire. Après différents tests avec le jeu de données, nous nous sommes rendus compte qu'il suffisait qu'une photo ait un recouvrement suffisant avec les deux photos adjacentes. Il est donc tout à fait réalisable de créer un MNE à partir de photos qui ont été prises selon des bandes parallèles. Cependant, le logiciel n'arrivera pas à créer le modèle 3D si le recouvrement entre deux photos successives n'est pas suffisant.

Certaines fonctionnalités ont été rajoutées après une première version du logiciel plutôt pensée pour le grand public. On a alors trouvé des fonctionnalités comme l'ajout de points correspondants sur chaque photo ainsi que la mise à l'échelle du modèle 3D.

Finalement, 123D Catch reste un logiciel gratuit très bien conçu et très facile d'utilisation. Cependant il reste à destination du grand public et n'est pas assez puissant pour créer des modèles 3D de grande précision, notamment à cause de la limite des 70 photos.

7.1.2 Recap 360

Recap 360 est le deuxième logiciel photogrammétrique développé par Autodesk (autodesk.com, [2014]). Il continue dans la même lignée que 123D Catch. Recap 360 est une version avancée de 123D Catch, mais à présent conçu et pensé pour les professionnels de la photogrammétrie. Le nombre limite de photos utilisables pour la création d'un modèle 3 D est de 300 photos, ce qui est bien mieux que les 70 photos de 123D Catch. De plus, le nombre de polygones créés peut atteindre plusieurs millions selon la taille du modèle 3D. La qualité des modèles 3D a donc aussi été améliorée lors du passage de 123D Catch à Recap 360.

Comme Recap 360 est une suite de 123D Catch, on retrouve toutes les fonctionnalités déjà présentes dans le premier logiciel, l'ajout de points correspondants entre chaque photo auxquels on peut maintenant rajouter des coordonnées X, Y et Z. De même, la méthode de calcul est semblable à celle de 123D Catch. Il faut qu'une photo ait assez de recouvrement avec les photos adjacentes.

7.1.3 Project Memento

Project Memento est, pour le moment, une version bêta du prochain logiciel photogrammétrique d'Autodesk (beta.autodesk.com, [2014]). C'est aussi la suite de Recap 360. Cependant, cette suite est beaucoup plus tournée vers la gestion et le travail sur les modèles 3D que vers la photogrammétrie.

Il est toujours possible de modéliser des objets à partir de photos, mais certaines fonctionnalités ont disparu, notamment l'ajout de points correspondants et la mise à l'échelle. D'un autre côté, des fonctionnalités que l'on pourrait retrouver dans des logiciels de modélisation 3D, comme Trimble RealWorks, ont été ajoutées. Il est possible de combler des espaces vides ou de supprimer des erreurs de calcul automatiquement détectées.

Une fonctionnalité très intéressante est l'échantillonnage du modèle 3D. En effet, si le modèle 3D est constitué de plusieurs millions de polygones, il sera très difficilement réutilisable dans un autre logiciel qui n'a pas forcément été conçu pour gérer autant de données. Or nous voulons réutiliser ce modèle 3D dans un logiciel comme AutoCad ou SketchUp pour y intégrer un projet architectural.

7.1.4 Les autres logiciels

Nous avons aussi testé d'autres logiciels qui n'ont pas été développés par Autodesk. Ces logiciels sont MyPhotoSynth et VisualSFM. Ils nous permettent d'obtenir des nuages de points à partir de photos. Pour obtenir un modèle 3D, il faut les combiner à un logiciel de modélisation 3D, Meshlab.

7.1.4.1 MyPhotoSynth et VisualSFM

MyPhotoSynth (photosynth.net, [2014]) est un logiciel, développé par Microsoft, qui fonctionne de la même manière que les logiciels développés par Autodesk, c'est-à-dire en utilisant le système Cloud. L'utilisateur n'a qu'à télécharger les photos sur le serveur de MyPhotoSynth pour que le logiciel calcule automatiquement l'orientation des différentes photos. Cependant, ce n'est pas un modèle 3D que l'utilisateur obtient en retour mais un

nuage de points. L'utilisateur peut ensuite télécharger le nuage de points à l'aide d'un applicatif, MyPhotoSynth Toolkit. Enfin, il faut utiliser un logiciel comme Meshlab pour transformer ce nuage de points en modèles 3D.

VisualSFM (Changchang, W. [2011], Changchang, W., & al. [2011]) est un logiciel développé par ChangChang Wu de l'université Washington à Seattle. Ce logiciel utilise la technologie SFM, Structure From Motion. Cette technologie consiste à chercher des points similaires entre les différentes photos, sans tenir compte de l'ordre des photos. Comme pour MyPhotoSynth, l'utilisateur a la possibilité de créer des nuages de points à partir de photos, qui seront ensuite transformés en modèle 3D avec le logiciel Meshlab.

Avec MyPhotoSynth et VisualSFM, l'ordre dans lequel les photos sont prises importe peu. Les logiciels utilisent des points de calage qu'ils détectent automatiquement, sans aucune intervention de l'utilisateur, pour recréer leur nuage de points respectifs. MyPhotoSynth est simple à utiliser comme 123D Catch ou Recap 360. Cependant, il ne permet pas d'obtenir un résultat sur la précision du nuage de points. VisualSFM est plus difficile à prendre en main car il n'est pas développé pour le grand public et ses capacités de calcul sont limitées. La taille des images en nombre de pixels doit être réduite, sous 3200 pixels (Falkingham, P. [2013]). Cependant, il permet de vérifier que les calculs se soient bien déroulés car le processus est segmenté par étapes.

Finalement, VisualSFM est plus difficile à utiliser que MyPhotoSynth et sa capacité de calcul est faible, mais il permet de s'assurer du bon déroulement des calculs du nuage de points. Meshlab est un bon logiciel pour la création et le travail sur les modèles 3D car il offre de nombreuses possibilités à l'utilisateur et il a été conçu pour travailler sur des fichiers lourds comme des nuages de points. Pour sa simplicité d'utilisation et sa plus grande capacité de calcul, on préfèrera utiliser MyPhotoSynth que VisualSFM.

7.1.4.2 Meshlab

Meshlab est, quant à lui, un logiciel développé par le centre de recherche ISTI-CNR. Il permet de travailler sur un nuage de points créé à partir d'un autre logiciel. L'utilisateur peut alors créer un modèle 3D à partir de ce nuage de points. A la base, Meshlab n'a pas été conçu pour créer des modèles 3D mais seulement pour travailler sur de tels fichiers. Voilà pourquoi on le combine à des logiciels comme MyPhotoSynth ou VisualSFM. L'utilisateur peut donc appliquer aux nuages de points différentes méthodes de maillage. La qualité de la grille maillée peut être choisie de façon à ce que le modèle 3D texturé soit plus ou moins proche de la réalité. La combinaison de Meshlab à MyPhotoSynth ou VisualSFM permet donc de créer des modèles 3D, à condition que les logiciels soient bien utilisés.

7.2 Les logiciels choisis : Recap 360 et Project Memento

Finalement, les logiciels que nous avons choisis d'utiliser sont Recap 360 et Project Memento.

Recap 360 permet d'utiliser un grand nombre de photos pour modéliser un objet avec une qualité et un nombre de polygones supérieurs à ceux que pourrait faire 123D Catch. Recap 360 reste très facile à utiliser et les modèles 3D qui sont créés par le logiciel sont facilement exportables vers un autre logiciel aux formats .obj ou .rcm. Le format .rcm a été spécifiquement développé par Autodesk pour les produits Autodesk, mais le format .obj est supporté par quasiment tous les logiciels de modélisation 3D.

Le logiciel Project Memento est, quant à lui, utiliser pour nettoyer le modèle 3D qui aura été préalablement calculé avec Recap 360 et exporté. Pour faciliter l'utilisation du modèle 3D dans d'autres logiciels, le modèle 3D sera aussi échantillonné grâce à la fonctionnalité correspondante du logiciel. L'échantillonnage appliqué au modèle 3D est un échantillonnage aléatoire sur lequel l'utilisateur ne peut qu'appliquer un degré d'échantillonnage allant de 0 à 90 %, par tranche de 5 %.

Après la création du modèle 3D sous Recap 360 et son nettoyage sous Project Memento, nous obtenons un modèle 3D utilisable dans n'importe quel logiciel de modélisation 3D. Pour créer un projet architectural à partir de ce modèle 3D, nous allons ensuite utiliser le logiciel SketchUp Pro.

7.3 Comparaison avec un MNE plus précis

Le problème des logiciels gratuits est le manque d'informations sur leur fonctionnement et leurs algorithmes de calcul. Il nous est donc impossible de connaître les algorithmes utilisés par Autodesk dans leurs logiciels photogrammétriques. Nous ne pouvons donc, a priori, pas assurer la précision de notre méthode. Cependant, pour vérifier qu'elle soit correcte et précise, nous avons comparé deux MNE.

Le premier MNE a été calculé selon la méthode que nous avons mise au point. Des cibles, qui vont servir à géoréférencer notre MNE, ont été placées au sol puis nous avons réalisé le vol du drone selon la méthodologie mise en place (voir §6.1). Le deuxième MNE, qui servira de MNE de référence, a été créé sous AutoCad à partir d'un semis de points mesurés au tachéomètre. Un point a été mesuré tous les 5 mètres environ et les cibles ont aussi été mesurées pour pouvoir recaler les deux MNE entre eux.

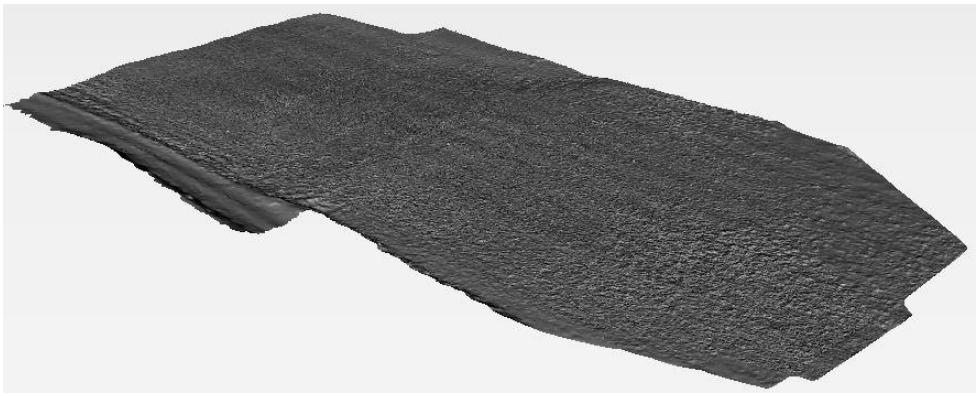
La zone test devait comporter du dénivelé avec, si possible, des lignes de rupture de pentes. De plus, il fallait que le terrain soit dégagé, le mieux étant du sol en terre sans aucune végétation ou alors de l'herbe coupée à ras. Cela permettra par la suite, d'éviter les erreurs

dues à la différence entre le sol mesuré au tachéomètre et le sol modélisé par photogrammétrie qui serait couvert de végétation.

Une fois la bonne zone test trouvée, nous avons effectué plusieurs vols avant d'obtenir des photos qui soient utilisables pour la modélisation du terrain. Une fois que les deux modèles ont été créés, nous les avons comparés sous Covadis à partir de différents outils. Voilà le premier modèle que nous avons obtenu sous Recap 360.

Modèle 3D obtenu avec Recap 360

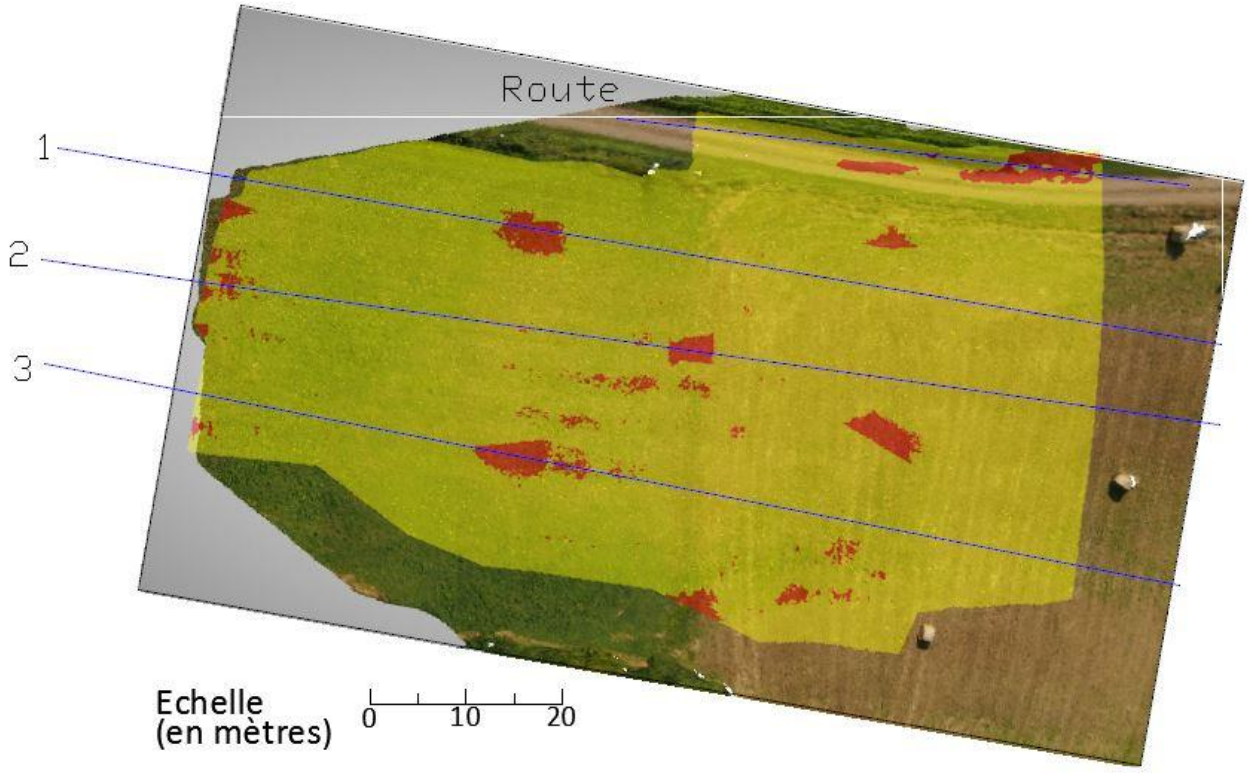
Ce modèle fait environ 150 Mo. Nous l'avons donc échantillonné à 90 % pour faciliter son utilisation sous AutoCad. Nous avons aussi nettoyé le modèle pour ne garder que les parties qui nous intéressent.



Modèle 3D nettoyé et échantillonné

Comme lors des tests précédents, les extrémités du modèle semblent déformées, mais ces parties du modèle ne nous intéressent pas. Cependant, nous avons quand même levé une partie du chemin de terre pour vérifier si, même aux extrémités du modèle, celui-ci est correct. Nous avons en premier lieu fait un calcul de déblais/remblais, dont les sommes de déblais ou de remblais devraient être proches de 0 $m^{3.}$ Nous obtenons un total de déblais/remblais de 388 m^3 pour une surface de plus de 4000 m² (voir Annexe H).

Pour mieux se représenter ce résultat, nous avons ensuite comparé nos deux modèles, pour voir les différences d'altitude maximum. Pour cela, nous avons utilisé Covadis qui permet de comparer les altitudes des deux MNE à chaque point relevé au tachéomètre. Le terrain que nous avons choisi comme zone test est recouvert d'une couche de verdure. Nous ne voyons donc pas toujours le sol. Il en résulte que nous obtenons une différence de 10 centimètres en moyenne entre les deux modèles avec une différence maximum de 35 centimètres (voir Annexe I), le modèle créé par photogrammétrie se situant majoritairement au-dessus du deuxième modèle.

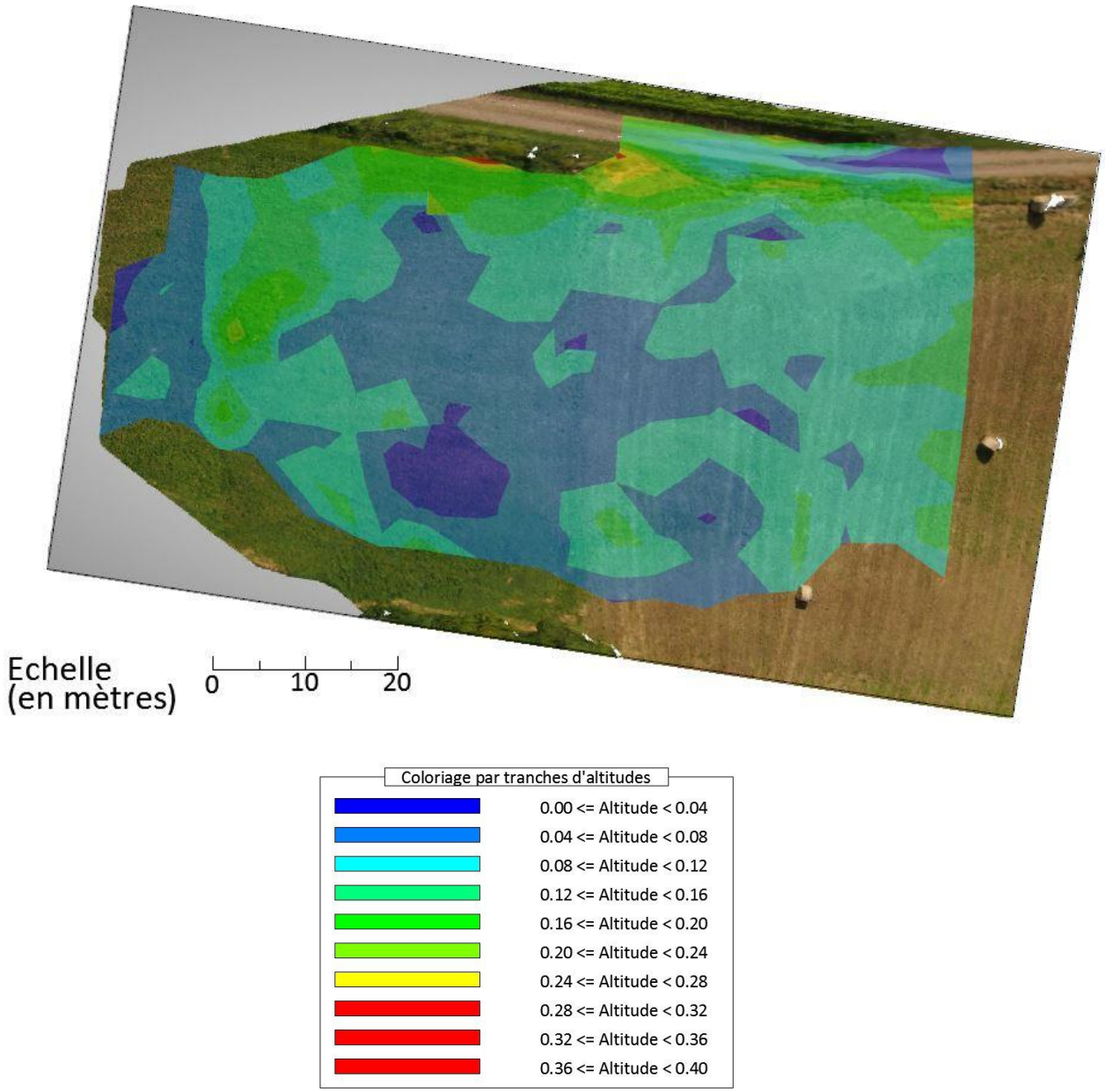


Modélisation du déblais/remblais et axe des profils en longs

Sur cette image, les déblais sont en rouge et les remblais sont en jaune.

Cependant, cette différence n'est pas homogène selon les zones du modèle. Nous avons, dans un premier temps, créé quatre profils en longs pour mieux visualiser les écarts entre les deux modèles. Nous pouvons constater que les différences d'altitude entre les deux modèles ne sont pas réparties également selon les profils (voir Annexe J).

Nous avons ensuite créé un modèle numérique représentant les différences d'altitude entre les deux modèles en fonction du terrain.



Modélisation des différences d'altitude entre les deux modèles

Nous nous rendons compte que le centre du modèle est essentiellement dans des tons bleus. Cela veut dire que la différence d'altitude entre les deux modèles est inférieure à 10 centimètres. De plus, le chemin de terre, où la végétation au sol est quasi inexistante, présente aussi une petite différence entre les deux modèles. Par contre, les zones où les différences sont les plus grandes sont situées au niveau du fossé. La végétation remplissant le fossé, il est normal que le modèle créé par photogrammétrie représente mal cette zone.

Il est aussi utile de comparer le temps qu'il a été nécessaire pour prendre les mesures pour créer ces deux modèles. Pour le modèle créé à partir des photos, il faut compter le vol qui dure environ 15 minutes, la mise en place du matériel et le levé des 8 cibles au tachéomètre soit un total d'environ 45 minutes. Pour le levé tachéométrique, il faut compter 1h15 environ pour mesurer ce terrain. Cela représente un gain de temps d'environ 40 % sur le terrain.

De plus, le traitement des données pour le modèle créé à partir des photos est automatique. Il faut juste compter le temps de cliquer les points similaires sur certaines photos pour que le logiciel puisse géoréférencer le modèle soit 30 minutes environ. Le traitement des données pour le modèle créé à partir du levé tachéométrique n'est guère plus long car le traitement sous Covadis est très simple.

Le gain de temps se fait donc essentiellement lors des mesures sur le terrain.

8 Rendu au client

Le but de ce projet étant de faire de l'intégration paysagère, le rendu au client ne permettra pas de faire des mesures. En effet, nous ne pouvons pas garantir la précision de notre modèle car nous ne connaissons pas les algorithmes de calcul du logiciel Recap 360. Le modèle 3D n'aura donc qu'un but informatif et permettra au client de visualiser le projet dans son environnement en 3 dimensions.

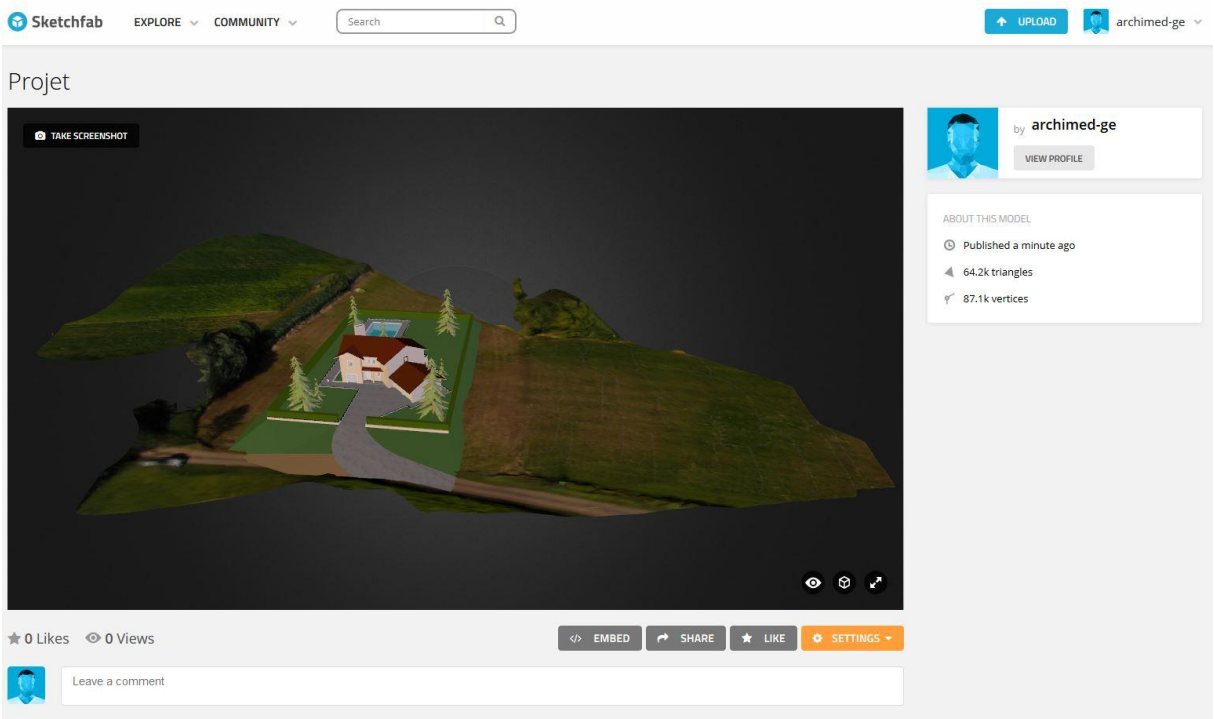
Pour cela, nous utilisons le modèle 3D que nous avons créé par photogrammétrie puis nous l'échantillonnons pour pouvoir l'utiliser dans le logiciel SketchUp Pro. En effet, ce logiciel n'a pas été conçu pour gérer un nombre important de données et peut planter ou être très ralenti s'il doit gérer un fichier trop volumineux. L'échantillonnage permet donc d'utiliser notre modèle sans que le logiciel ne plante. Une fois dans le logiciel, le modèle est directement à la bonne échelle et bien orienté, grâce à la correspondance des points appliquée durant le traitement des photos dans Recap 360. Il ne nous reste donc plus qu'à intégrer notre projet sur notre modèle numérique texturé, à nettoyer les imperfections du modèle et à appliquer des effets visuels comme les textures.

Intégration paysagère à partir de notre modèle 3D dans SketchUp

L'important n'est donc pas la précision du modèle mais bien le rendu visuel final. Le client préfèrera voir un modèle 3D beau mais pouvant présenter des erreurs de calculs plutôt qu'un modèle exact et précis mais qui ne sera pas beau. Le fait que la modélisation à partir du logiciel Recap 360 ne soit pas aussi précise que d'autres méthodes n'est donc pas grave.

La visualisation de modèle 3D est difficile pour une personne ne disposant pas des logiciels adaptés. Le moyen le plus simple semble de créer une vidéo en tournant autour du modèle 3D et d'envoyer cette vidéo au client. Cependant, il existe depuis quelques années des sites Internet qui permettent d'héberger des modèles 3D et de les visualiser sans avoir à installer un logiciel. Nous avons alors décidé d'utiliser ces sites Internet pour que le client puisse visualiser son projet.

Parmi ces sites, nous pouvons trouver 3dtotal, TurboSquid ou Sketchfab. Pour sa simplicité d'utilisation, nous avons choisi d'utiliser le logiciel Sketchfab. Il permet de mettre en ligne son modèle 3D et de le protéger, de manière à ce que seul le propriétaire du modèle 3D ou une personne ayant le lien Internet associé puisse le visualiser. Cependant, il faudra faire attention à la taille du fichier. Le site Internet ne permet de télécharger que des fichiers dont la taille est inférieure à 50 Mo pour la version gratuite et 200 Mo pour la version payante. La version payante permet aussi d'héberger des modèles 3D sans limite de nombre. De plus, il est possible que les textures soient mal affichées. Il faut alors modifier le côté d'affichage de la texture sur les faces défectueuses.



Modèle 3D visualisé sur le site Sketchfab

De cette manière, nous n'aurons qu'à envoyer par mail au client le lien Internet le redirigeant vers le modèle 3D de son projet, sur le site Internet de Sketchfab ou d'Archimed-GE. En effet, il est possible de faire figurer un modèle 3D hébergé par Sketchfab sur un autre site Internet.

9 Concept d'un LiDAR aéroporté par drone

9.1 Description du concept

Il existe déjà des LiDARs aéroportés par avion. Les LiDARs aéroportés par drone n'ont pas attendus longtemps avant de voir le jour (Wallace, L. & al [2012]). Cependant, cette technologie est encore trop coûteuse pour un cabinet de géomètre-expert car il faut compter le système d'acquisition des données qui doit être précis et assez léger pour être supporté par le drone, mais il faut aussi compter le système de positionnement du drone. A ce jour, les systèmes d'acquisition utilisés ne sont pas encore commercialisés à un prix abordable et le système de positionnement utilisé de nos jours dans ces types de travaux est un GPS de précision utilisé habituellement pour des applications topographiques.

Antenne GPS sur un drone utilisant un système de scan 3D de l'entreprise Phoenix Aerial Systems

Ne disposant d'aucun de ces deux systèmes, le but a été de trouver une solution économique pour créer un semis de points de précision à l'aide du DJI S800. Cependant, à cause d'un manque de connaissance en électronique, le système choisi finalement est resté au niveau de concept.

9.2 Problématique de ce concept

La problématique la plus importante est la précision obtenue sur le MNE et surtout dans la mesure de la position du drone, car c'est sur cette donnée que les erreurs peuvent être les plus importantes.

Il faut ensuite que les mesures soit prises à des intervalles très petits, de l'ordre de deux ou trois dixièmes de seconde, car le drone se déplace rapidement. Si le drone se déplace à une vitesse de 35 km/h, une mesure sera prise environ tous les 2 mètres si l'intervalle est de 0,2

seconde. Cependant, cette vitesse ne sera pas atteinte car le vol de drone nécessite une grande précaution et donc, une vitesse raisonnable.

La dernière problématique est le suivi du drone. Il faut que le système de positionnement soit assez précis, mais aussi assez rapide pour le suivre.

9.3 Solution envisagée pour le système d'acquisition

Pour obtenir un semis de points de précision, le système d'acquisition envisagé est un distancemètre fixé sous la nacelle. Ce distancemètre devra être modifié pour pouvoir enregistrer les mesures à l'aide d'une carte SD et, comme prévu pour la photogrammétrie, prendre des mesures à intervalles réguliers à l'aide d'un intervallomètre. Le fait de le fixer à la nacelle permettrait de mesurer les points à la verticale du drone à 3° près, selon le constructeur de la nacelle, DJI. Pour ce qui est de la mesure de la hauteur, Leica affirme qu'un distancemètre de type D2 est capable de prendre une mesure en moins de 0,5 seconde sans toutefois dire combien de temps exactement il faut au distancemètre pour mesurer un point. Cela représente au moins un point tous les 5 mètres, ce qui est suffisant pour créer un semis de points dans un champ ou un terrain vague.

9.4 Solutions envisagées pour le système de positionnement

Comme pour une campagne de vol photogrammétrie ou LiDAR, il faut connaître précisément la position du système d'acquisition pour pouvoir calculer les points mesurés. Le fait que la nacelle compense les mouvements du drone permet de mesurer à la verticale du terrain. Il n'est donc pas nécessaire de mesurer les variations d'angle du drone grâce à des accéléromètres ou des gyroscopes. Nous ne cherchons donc qu'à mesurer la position du système d'acquisition.

La première solution envisagée a été la plus simple, le GPS. Des GPS sont conçus spécialement pour le vol de drone. Ils permettent notamment de prévoir des plans de vol dans le cadre de vols automatiques. Cette solution est très pratique car elle permet de s'assurer que l'ensemble de la zone est recouverte par les mesures. Cependant, ces GPS sont trop imprécis, souvent de l'ordre du mètre, ce qui est trop peu pour un MNE.

La seconde solution envisagée est l'utilisation d'un tachéomètre robotisé qui suivrait un prisme fixé sur le drone. Le cabinet de géomètre expert a récemment acquis une station totale qui permettrait de mettre en place ce système. Ce système est une bonne alternative au GPS et il fonctionnerait correctement car la législation ne permet pas de voler, dans le cadre d'un scénario S-1, à plus de 100 mètres du pilote. Cependant, cette station totale ne peut pas suivre le drone. En effet, sa vitesse de rotation maximum est de 5 mètres par secondes pour un objet qui se situe à 20 mètres d'elle.

La troisième solution que nous avons envisagée existe déjà dans le milieu aéronautique, il s'agit de la radiogoniométrie. Cette technique a pour but de mesurer, grâce à des goniomètres, une direction d'où est émise une onde par rapport à une direction de référence. Cette technique est déjà utilisée pour faire de la triangulation, et repérer des objets comme des avions (Delaveau, F. & al [2012]). Durant la seconde Guerre mondiale, les allemands utilisaient cette technique pour retrouver les cachettes d'où émettaient les résistants. Cette technique pourrait donc être utilisée pour repérer notre drone en coordonnées X, Y et Z.

Cette dernière solution permet de respecter l'ensemble des problématiques définies précédemment.

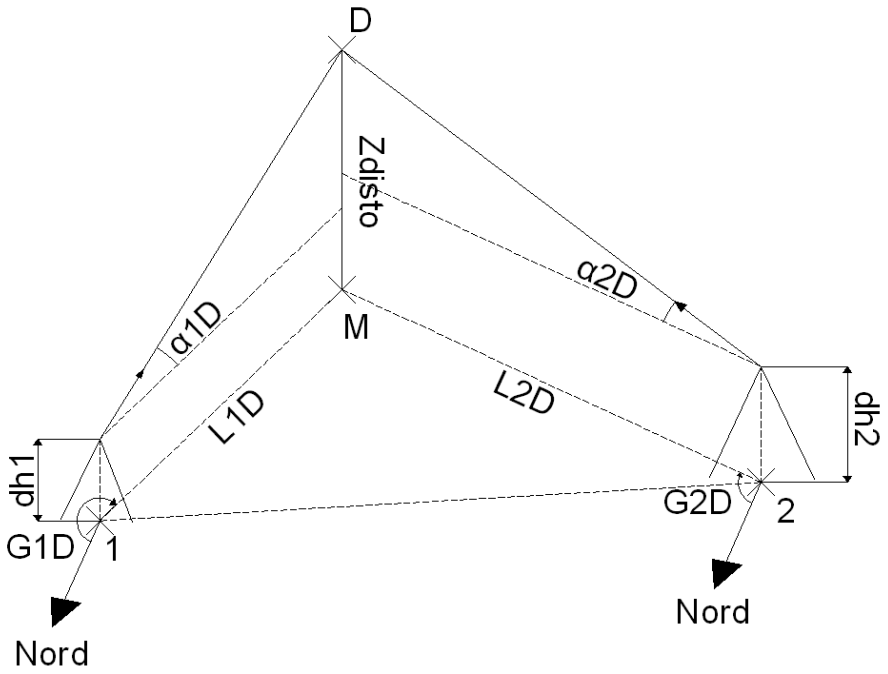
9.5 Utilisation de la radiogoniométrie dans ce projet

9.5.1 Concept

Dans ce projet, nous voulons connaître les coordonnées X, Y et Z de notre drone à chaque mesure verticale prise par le distancemètre. Pour atteindre ce but, nous allons utiliser la radiogoniométrie pour trianguler la position du drone.

Il faudra rajouter sur le drone, en plus du distancemètre, un émetteur radio qui émettra une onde radio à une fréquence connue. Nous utiliserons un minimum de quatre goniomètres pour avoir une redondance dans les mesures et ainsi, pouvoir appliquer une compensation à ces mesures. Les goniomètres seront constitués d'une antenne radio directionnelle, d'une boussole, d'un inclinomètre, d'un système d'enregistrement des mesures, d'une nivelle et d'un système d'asservissement lui permettant de suivre le signal radio le plus puissant. De cette manière, chaque goniomètre pourra mesurer un angle vertical et un angle horizontal. La synchronisation des mesures entre le distancemètre et les goniomètres se fera à travers l'onde émise par le drone. Lorsque le distancemètre prendra une mesure, l'onde émise transmettra l'ordre aux goniomètres de mesurer les angles verticaux et horizontaux au même instant. Avant de pouvoir trianguler la position du drone, il faudra effectuer un rapide levé au tachéomètre pour mesurer la position des goniomètres, qui seront répartis sur le terrain de façon homogène.

En couplant les mesures de chaque goniomètre connu en coordonnées, nous aurons alors les coordonnées du drone à chaque mesure. Il nous suffit alors de faire correspondre les mesures du distancemètre avec les résultats obtenus pour créer un semis de points. Le schéma suivant représente le système composé de deux goniomètres :



M : point au sol de coordonnées XM, YM, ZM inconnues
D : émetteur de coordonnées XD, YD, ZD inconnues
i : récepteur i de coordonnées Xi, Yi ,Zi connues
GiD : gisement de i vers D connu
αiD : angle vertical de i vers D connu
LiD : longueur horizontal de i vers D inconnue
dhi : hauteur du récepteur i connue
Zdisto : hauteur de l'émetteur connue

Schéma du système composé de deux goniomètres

Pour calculer les coordonnées X, Y et Z de notre point au sol, nous calculons d'abord la position de l'émetteur fixé au drone en respectant la méthodologie suivante :

- Nous commençons par calculer les distances entre les récepteurs et l'émetteur par intersection de droites :

$$L_{1D} = \frac{\Delta X_{12} \cos G_{2D} - \Delta Y_{12} \sin G_{2D}}{\sin(G_{1D} - G_{2D})} \quad et \quad L_{2D} = \frac{\Delta X_{21} \cos G_{1D} - \Delta Y_{21} \sin G_{1D}}{\sin(G_{2D} - G_{1D})}$$

- Nous calculons ensuite les coordonnées de X et Y en appliquant une moyenne des points lancés :

$$\begin{cases} X_D = \frac{1}{2}\left((X_1 + L_{1D} \sin G_{1D}) + (X_2 + L_{2D} \sin G_{2D})\right) \\ Y_D = \frac{1}{2}\left((Y_1 + L_{1D} \cos G_{1D}) + (Y_2 + L_{2D} \cos G_{2D})\right) \end{cases}$$

- Nous calculons enfin la coordonnée Z de l'émetteur par moyenne de points lancés

$$Z_D = \frac{1}{2}\left((Z_1 + dh_1 + L_{1D} \tan \propto_{1D}) + (Z_2 + dh_2 + L_{2D} \tan \propto_{2D})\right)$$

A partir du schéma précédent et des formules utilisées précédemment, nous pouvons en déduire des formules permettant de calculer les coordonnées de notre point au sol :

$$\begin{cases} X_M = X_D \\ Y_M = Y_D \\ Z_M = Z_D - Z_{Disto} \end{cases}$$

Pour réaliser ce projet, nous avons pensé utiliser un système qui s'appelle Arduino. Il s'agit de cartes électroniques entièrement programmables auxquelles nous pouvons rajouter des composants électroniques comme des LED, des afficheurs, des boussoles ou des inclinomètres. Nous pourrions aussi utiliser ce système pour modifier le distancemètre afin qu'il prenne des mesures en synchronisation avec le reste du système. Tous les composants qui ont été choisis pour le calcul de précision sont donc des éléments qui sont compatibles avec cette carte électronique Arduino.

9.5.2 Calcul de la précision a priori d'un tel système

Nous avons voulu vérifier que ce système soit assez précis pour être réalisable. Nous avons donc calculé la précision que nous pouvions obtenir a priori sur une mesure à partir de deux goniomètres, puis avec 4 goniomètres.

Pour ce premier calcul, nous considérons que l'ensemble des goniomètres présente la même précision. Les précisions des boussoles et des inclinomètres sont les précisions les plus importantes. La boussole présente une résolution de 0,1° et l'inclinomètre présente une résolution de 0,0035° (voir Annexe K). Cependant, il n'y a aucun renseignement vis-à-vis de la précision et les constructeurs n'ont pu nous renseigner que de manière approximative. Nous avons donc estimé la précision de la boussole à 2°, et la précision de l'inclinomètre à 0,1°. Une fois que les précisions que l'on peut attendre de tous les éléments constitutifs de ce système sont connues, le seul élément qui peut encore être modifié est la distance entre les goniomètres. Comme nous ne pouvons voler que dans le cadre d'un scénario S-1, nous allons fixer la distance limite entre deux goniomètres adjacents à 70 mètres, car cela nous permet de recouvrir une zone de vol d'environ 100 mètres autour du pilote.

Pour calculer la précision que nous pouvons obtenir à partir de ce système, nous appliquons une transmission d'erreurs moyennes quadratiques sur les formules vues en §9.5.1. Nous obtenons les formules suivantes :

$$\begin{cases} mq_{XM} = \frac{1}{2}\sqrt{2mq_X^2 + \sum_{i=1}^{2}(\sin G_{iD})^2 mq_{LiD}^2 + mq_{boussole}^2 \sum_{i=1}^{2} L_{iD}^2 (\cos G_{iD})^2} \\ mq_{YM} = \frac{1}{2}\sqrt{2mq_Y^2 + \sum_{i=1}^{2}(\cos G_{iD})^2 mq_{LiD}^2 + mq_{boussole}^2 \sum_{i=1}^{2} L_{iD}^2 (\sin G_{iD})^2} \\ mq_{ZM} = \frac{1}{2}\sqrt{2mq_Z^2 + 2mq_{dh}^2 + \sum_{i=1}^{2}(\tan G_{iD})^2 mq_{LiD}^2 + mq_{inclinomètre}^2 \sum_{i=1}^{2} L_{iD}^2 (1 + (\tan G_{iD})^2)^2 + 4mq_{Disto}^2} \end{cases}$$

Dans le premier cas, avec deux goniomètres, nous pouvons attendre une précision comprise entre 50 centimètres et 1 mètre en X et Y et 20 centimètres environ en Z selon les dispositions des deux goniomètres (voir Annexe L). La précision en Z est meilleure que celle en X et Y car l'inclinomètre est un instrument plus précis que la boussole. Cependant, ces résultats ne sont pas satisfaisants pour relever des points en vue de créer un MNT.

Dans le cas où nous utilisons quatre goniomètres répartis autour du terrain, nous pouvons calculer les distances entre les récepteurs et l'émetteur à partir de deux couples de droites. Nous appliquons donc une moyenne à ces deux intersections de droites pour obtenir ces distances $\overline{L_{\iota D}}$. Nous appliquons ensuite la même méthode que celle vue en §9.5.1 pour calculer les coordonnées du drone. Nous obtenons le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} X_M = \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{4} X_i + \overline{L_{\iota D}} \sin G_{iD} \\ Y_M = \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{4} Y_i + \overline{L_{\iota D}} \cos G_{iD} \\ Z_M = \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{4}(Z_i + d_{hi} + \overline{L_{\iota D}} \tan \propto_{iD}) - Z_{Disto} \end{cases}$$

De même, nous appliquons une transmission d'erreurs moyennes quadratiques à ces formules et nous obtenons une précision autour de 50 centimètres en X et Y et 12 centimètres en Z si nous nous plaçons dans le même cas qu'avec deux goniomètres (voir Annexe M). La différence entre les précisions en X, Y et en Z est due au fait que la boussole est bien moins précise que l'inclinomètre.

Même si la précision en X et Y pourrait être encore amplement améliorée, c'est surtout la précision en Z qui nous intéresse pour mesurer un semis de points de cette manière. En effet, si un point est placé 50 centimètres à côté de sa position réelle dans le cadre d'un MNE, cela n'a pas vraiment une grande influence sur le résultat final. Cependant, si un point est associé à une altitude qui est fausse de 50 centimètres, cela sera beaucoup plus influent sur le résultat final du MNE.

Pour améliorer la précision de ce système, nous pourrions utiliser des instruments plus précis. En effet, les instruments que nous avons pris en compte sont des instruments peu coûteux et donc d'une faible précision. Ainsi, en utilisant une boussole et un inclinomètre deux fois plus précis, nous améliorerions la précision pour obtenir 25 centimètres environ en X et Y et 6 centimètres en Z. Encore plus précis, si les résolutions de la boussole et de l'inclinomètre correspondaient à leur précision, nous aurions un système dont la précision serait de 3 centimètres en X, Y et Z.

9.5.3 Calcul du coût estimatif d'un tel système

Ce système permettrait d'obtenir des semis de points rapidement et à moindre coût. En effet, le prix d'un tel système serait d'environ 1450 € (voir Annexe N), sans compter le drone. Ce prix est approximatif car le choix des composants utilisés est tout à fait arbitraire et certaines quantités et certains prix sont estimés car aucune référence n'existe.

9.6 Conclusion sur ce concept

Malgré le fait que ce projet ne soit resté qu'au stade de concept, il pourrait fournir des semis de points rapidement, avec une précision suffisante pour le calcul de MNE, et à moindre coût. La précision pourrait encore être améliorée en utilisant des composants de meilleure qualité et dont la précision serait connue.

La radiogoniométrie est une technique qui gagnerait à être utilisée à petite échelle car elle n'est utilisée aujourd'hui que dans les transmissions d'ondes très longue distance pour la localisation d'avions ou de bateaux.

Conclusion

Le but de ce Projet de Fin d'Etudes était de mettre en place un système permettant de créer des modèles numériques d'élévation dans le but de faire de l'intégration architecturale. Nous avions un drone pour prendre des mesures. Nous voulions réaliser deux méthodes pour créer ces modèles.

La première méthode consistait à prendre des photos avec le drone pour fabriquer un modèle 3D par photogrammétrie. Nous avons utilisé des logiciels open-source ou déjà disponibles dans le cabinet de géomètres experts, Archimed-GE. Il a fallu mettre en place l'ensemble du système, en commençant par le choix de l'appareil photo jusqu'à la mise en place d'un rendu pour le client. Il a aussi fallu apprendre à piloter le drone et obtenir les autorisations de vol. Les résultats que nous avons obtenus en utilisant cette méthode sont satisfaisants pour faire de l'intégration architecturale et nous pourrions donc tout à fait utiliser cette méthode si un client venait à demander ce genre de travaux.

La seconde méthode s'apparente à un LiDAR unidirectionnel et utilise la radiogoniométrie, une technique utilisant les ondes radio pour repérer des objets. Cette méthode permettrait de créer un semis de points bien plus rapidement que par un levé tachéométrique traditionnel. Elle est malheureusement restée au stade de concept à cause d'un manque de connaissance en électronique. Nous avons cependant démontré par le calcul qu'un tel système serait suffisamment précis pour créer un semis de points, à condition d'utiliser des instruments assez précis.

Enfin, je pense que les drones sont de très bons outils qu'il faudra apprendre à utiliser dans un futur proche car le nombre d'applications ne cessent de croître et le marché va se développer très rapidement. Cependant, ce marché nécessite encore de grands changements au niveau de la sécurité des drones, de la réglementation ou de la facilité d'utilisation des méthodologies. Mon Projet de Fin d'Etudes a permis à l'entreprise Archimed-GE de faire partie des précurseurs utilisant cette technologie et de prendre un peu d'avance dans ce domaine.

Bibliographie

Colomina, I. & Molina, P. (2014), UNMANNED AERIAL SYSTEMS FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING: A REVIEW, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 92 (2014)*, 79-97.

Changchang, W. (2011), VISUALSFM : A VISUAL STRUCTURE FROM MOTION SYSTEM, Disponible à : http://ccwu.me/vsfm/ [Visité le 10 juillet 2014].

Changchang, W., Agarwal, S., Cruless, C. & Seitz, S. (2011), MULTICORE BUNDLE ADJUSTMENT, *CPVR.*

Delaveau, F. & Livran, Y. (2012), RADIOSURVEILLANCE DU SPECTRE : GONIOMETRIE ET LOCALISATION, Disponible à : http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/technologies-de-l-information-th9/gestion-du-spectre-electromagnetique-42590210/radiosurveillance-du-spectre-te6892/radiogoniometrie-te6892niv10002.html [Visité le 10 juillet 2014].

Eisenbeiss, H. (2004), A MINI UNMANNED AERIAL VEHICLE (UAV): SYSTEM OVERVIEW AND IMAGE ACQUISITION, *International Workshop on Processing and Visualization using High-Resolution Imagery.*

Falkingham, P. (2013), GENERATING A PHOTOGRAMMETRIC MODEL USING VISUALSFM, AND POST-PROCESSING WITH MESHLAB.

Han, J., Xu, Y., Long, D. & Chan, Y. (2013), LOW-COST MULTI-UAV TECHNOLOGIES FOR CONTOUR MAPPING OF NUCLEAR RADIATION FIELD, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Volume 70, 401-410.

Kraus, K., Waldhaüsl, P., Grussenmeyer, P. & Reis, O. (1998), MANUEL DE PHOTOGRAMMETRIE : PRINCIPES ET PROCEDES FONDAMENTAUX, *Hermes Sciences Publications.*

Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement. (2012), UTILISATION DE L'ESPACE AERIEN PAR LES AERONEFS QUI CIRCULENT SANS PERSONNE A BORD. *Arrêté du 11 avril 2012.*

Pires, Rayner, M., Chaves, Arthur, A. & Branco, Kalinka, R.L.J.C. (2014), SMART SENSOR PROTOCOL – A NEW STANDARD FOR UAV AND PAYLOAD INTEGRATION, *2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*.

Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M. & Sarazzi, D. (2011), UAV PHOTOGRAMMETRY FOR MAPPING AND 3D MODELING –CURRENT STATUS AND FUTURE PRESPECTIVES-, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII*, 25-31.

Site Internet 123D Catch, Disponible à : http://www.123dapp.com/catch [Visité le 10 juillet 2014].

Site Internet du Développement Durable, Disponible à : http://www.developpement-durable.gouv.fr/Demarches-pour-effectuer-le,39364.html [Visité le 10 juillet 2014].

Site Internet MyPhotoSynth, Disponible à : http://photosynth.net/about.aspx [Visité le 10 juillet 2014].

Site Internet Project Memento, Disponible à : https://beta.autodesk.com/callout/?callid=D69655022B4F42C880513D4E3085C7D0 [Visité le 10 juillet 2014].

Site Internet Recap 360, Disponible à : http://www.autodesk.com/products/recap/overview [Visité le 10 juillet 2014].

Site Internet Techno-science, Disponible à : http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=12045 [Visité le 10 juillet 2014].

Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C. & Turner, D. (2012), DEVELOPMENT OF A UAV-LIDAR SYSTEM WITH APPLICATION TO FOREST INVENTORY, *Remote Sensing*, *4*, 1519-1543.

Sommaire des annexes

Annexe A : Tableau récapitulatif des scénarios de vols et des catégories de drone……....2

Annexe B : Guide d'utilisation du drone DJI S800…….3

Annexe C : Certificat d'aptitude théorique……. 10

Annexe D : Déclaration du niveau de compétence……. 11

Annexe E : Attestation de conformité navigabilité……. 12

Annexe F : Déclaration de conformité de l'exploitant……..... 14

Annexe G : Attestation du dépôt de MAP……...15

Annexe H : Calcul de déblais/remblais entre les deux modèles…….....16

Annexe I : Listing des différences d'altitude entre les deux modèles……17

Annexe J : Profils en long des deux modèles……..22

Annexe K : Caractéristiques des éléments constitutifs nécessaires au calcul de la précision du système de radiogoniométrie…….....23

Annexe L : Calcul de la précision du système avec deux goniomètres……...26

Annexe M : Calcul de la précision du système avec quatre goniomètres……... 27

Annexe N : Calcul du coût estimatif du système de relevé par radiogoniométrie…….. 29